O PETRÓLEO E A BIOSSORÇÃO

FIBRAS DE COCO

Fundamentos, caracterização e aplicação

Célia Karina Maia Cardoso
Ícaro Thiago Andrade Moreira
Olívia Maria Cordeiro de Oliveira
Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato

Editora Poisson

Célia Karina Maia Cardoso
Ícaro Thiago Andrade Moreira
Olívia Maria Cordeiro de Oliveira
Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato

O petróleo e a biossorção
Fibras de coco
Fundamentos, caracterização e aplicação

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2026

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C980o

O Petróleo e a biossorção - fibras de coco: fundamentos, caracterização e aplicação / Célia Karina Maia Cardoso, Ícaro Thiago Andrade Moreira, Olívia Maria Cordeiro de Oliveira, Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato – Belo Horizonte MG: Editora Poisson, 2026. 56 p.

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-696-7
DOI: 10.36229/978-65-5866-696-7
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Petróleo 2. Química. 1. CARDOSO, Célia Karina Maia 2. MOREIRA, Ícaro Thiago Andrade 3. OLIVEIRA, Olívia Maria Cordeiro de 4. LOBATO, Ana Katerine de Carvalho Lima 5. Título

CDD-540

SÔNIA MÁRCIA SOARES DE MOURA – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterada.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

Autores

Célia Karina Maia Cardoso

Doutora em Engenharia Química pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPEQ-UFBA), mestre em Engenharia Química (PPEQ-UFBA) e graduada em Engenharia Química pela Universidade Salvador (UNIFACS). Atua em projetos de pesquisa e consultorias técnicas nas áreas de bioprocessos, remediação de áreas impactadas por derramamentos de petróleo, desenvolvimento de biossorventes de origem lignocelulósica e processos de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS), com foco em soluções inovadoras e sustentáveis. Desenvolve pesquisas em modelagem cinética e de equilíbrio de sorção, caracterização de materiais biológicos, análise de componentes orgânicos e inorgânicos em ambientes naturais e petróleo, além da aplicação de biotecnologias voltadas à remediação ambiental e à mitigação das mudanças climáticas. É inventora de patentes relacionadas ao desenvolvimento de biossorventes para remediação de derramamentos de petróleo e autora de artigos científicos publicados em periódicos internacionais de elevado impacto científico. Integra a equipe do Laboratório de Estudos do Petróleo (LEPETRO), participa de projetos de pesquisa voltados à remediação ambiental e ao desenvolvimento de soluções sustentáveis para ecossistemas costeiros, e é membro dos grupos de pesquisa BTS – Biogeoquímica de Ecossistemas Marinhos Tropicais e Soluções Baseadas na Natureza e Engenharia de Bioprocessos e Biomateriais.

Ícaro Thiago Andrade Moreira

Professor do Departamento de Oceanografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (UFBA), atua nas áreas de Biogeoquímica Marinha, Biotecnologia Marinha, Oceanografia Química e Poluição Marinha. É graduado em Ciências Biológicas, Mestre em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente e Doutor em Geociências. É Pesquisador PQ 1B do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Foi Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente (POSPETRO/UFBA) entre 2022 e 2025, do qual é atualmente Vice-Coordenador, e coordena o Programa de Recursos Humanos PRH-36/UFBA, vinculado à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).Sua atuação científica concentra-se na geoquímica do petróleo e ambiental, biogeoquímica marinha e poluição de ecossistemas costeiros tropicais, investigando a distribuição, transformação e destino de contaminantes orgânicos e inorgânicos e suas interações com a biota e os diferentes compartimentos ambientais. Desenvolve pesquisas sobre intemperismo e comportamento do petróleo no ambiente marinho, resposta a derramamentos, bioacumulação e resiliência de ecossistemas costeiros, incluindo manguezais e ambientes recifais. Desenvolve e aplica biotecnologias marinhas e Soluções Baseadas na Natureza (SbN) voltadas à prevenção, mitigação e recuperação de ecossistemas marinhos, com ênfase em fitorremediação, biodegradação por microrganismos marinhos, biossorção e uso de microalgas para tratamento de efluentes e valorização de biomassa no contexto da bioeconomia circular. Suas pesquisas abrangem ainda carbono azul, mudanças climáticas e recuperação de ecossistemas marinhos e costeiros. Coordena e integra projetos financiados por agências de fomento e pelo setor de energia, incluindo CNPq, FINEP, CAPES e FAPESB, e mantém colaborações científicas nacionais e internacionais. É membro da Associação Latino-Americana de Geoquímica Orgânica (ALAGO) e integra redes internacionais de pesquisa. Possui ampla experiência na formação de recursos humanos, tendo orientado mais de 20 mestres e mais 10 doutores, além de estudantes de iniciação científica e pesquisadores de pós-doutorado. Recebeu premiações nacionais e internacionais por trabalhos e contribuições no campo das biotecnologias marinhas e de inovação, com destaque para pesquisas voltadas à aplicação de processos biotecnológicos na recuperação e sustentabilidade de ambientes marinhos.

Autores

Olívia Maria Cordeiro de Oliveira

Possui Graduação e Mestrado em Geologia pela Universidade Federal da Bahia (1992 e 1995, respectivamente) e Doutorado em Geoquímica pela Universidade Federal Fluminense (2000). Ao longo de sua carreira, tem se dedicado à educação e popularização da ciência, atualmente ocupando o cargo de Coordenadora de Pesquisa da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG) da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e Coordenadora do Comitê Científico para o Monitoramento e Enfrentamento das Emergências Climáticas do Consórcio Nordeste. Como Professora Titular do Departamento de Geofísica e membro do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente (POSPETRO)/UFBA, contribui significativamente para o avanço do conhecimento em sua área. Atuou como Diretora do Instituto de Geociências/UFBA em dois mandatos consecutivos: 2014 a 2018 e 2018 a 2022. Coordenadora de Projetos de Pesquisa e Autora de inúmeros artigos científicos indexados, Líder dos Grupos de Pesquisa ''Petróleo e Desenvolvimento Sustentável (PETRODES)'' e ''Investigação Forense Multidisciplinar'', certificados pelo CNPq e reconhecidos pela UFBA. Membro da Comissão Gestora do PRH/ANP 36. É membro da Câmara de Articulação Interfederativa do Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM). Avaliadora institucional brasileira do INEP/MEC e capacitada para avaliação e credenciamento no MERCOSUL (treinamento ARCU-SUR) para o curso de graduação em Geologia. Membro da Câmara de Assessoramento e Avaliação da Fapesb, Área ''Ciências Exatas e da Terra'', biênio 2024-2026. Membro Titular da Academia de Ciências da Bahia (ACB). Tem experiência na área de Geociências e Oceanografia, com ênfase em Geoquímica Ambiental, atuando nos seguintes temas: Geologia do Petróleo, Geoquímica do Petróleo, Geociências Forense, Oceanografia Química e Monitoramento Geoquímico. Por dedicação e contribuição ao avanço do conhecimento científico, foi agraciada com o Título Honorífico de ''Amiga da Marinha''

Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1999), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2003), doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2010) com período sanduíche na The University of Manchester na Inglaterra e Pós-doutorado na Universidade Federal da Bahia. Atualmente é Professora ES III na Universidade Salvador, Pesquisadora e Professora permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal da Bahia/Universidade Salvador, líder do grupo de pesquisa Engenharia de Bioprocessos e Biomateriais do CNPq, coordenadora do Laboratório de Engenharia de Bioprocessos (BIOPRO) e parte do corpo docente do PRH 36 - Programa de Recursos Humanos em Petróleo e Meio Ambiente da Universidade Federal da Bahia (PEMA/UFBA) . Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Biotecnologia, atuando principalmente nos seguintes temas: biocombustíveis, biossurfactante, biopolímeros, biomassa lignocelulósica, petróleo, remediação, análise de fluxos metabólicos, fermentação e produção de antibiótico

Apresentação

Os derramamentos de petróleo representam um dos maiores desafios ambientais da atualidade, exigindo o desenvolvimento de tecnologias capazes de minimizar seus impactos de forma eficiente e ambientalmente sustentável. Entre as alternativas disponíveis, os biossorventes obtidos a partir de resíduos lignocelulósicos destacam-se por aliarem baixo custo, elevada disponibilidade, biodegradabilidade e potencial de aplicação na remediação de ambientes contaminados. Neste livro é apresentado um estudo sobre a utilização de fibras residuais de coco (*Cocos nucifera* L.) como biossorventes para derramamentos de petróleo em ambiente marinho. Ao longo da obra, são discutidos os fundamentos científicos que justificam o emprego desse resíduo agroindustrial, desde sua composição e estrutura até sua aplicação como material sorvente para hidrocarbonetos. Os capítulos abordam conceitos relacionados ao petróleo, aos principais acidentes envolvendo derramamentos e às estratégias de resposta empregadas na remediação desses eventos. Em seguida, são apresentados os aspectos estruturais e químicos da fibra de coco, sua caracterização físico-química, os ensaios de biossorção, os estudos cinéticos e de equilíbrio, bem como a modelagem matemática utilizada para compreender os mecanismos envolvidos na retenção de petróleo. Os resultados demonstram que a fibra de coco in natura apresenta características favoráveis à biossorção de petróleo, evidenciando seu potencial como uma solução baseada na natureza para aplicações em ambientes aquáticos contaminados. Além de contribuir para a mitigação dos impactos ambientais causados por derramamentos de petróleo, sua utilização promove a valorização de resíduos agroindustriais e fortalece os princípios da economia circular e da sustentabilidade. Destinada a estudantes, pesquisadores e profissionais das áreas de Engenharia, Química, Meio Ambiente e Petróleo, esta obra reúne fundamentos científicos e resultados experimentais que contribuem para a compreensão do potencial da fibra de coco in natura como biossorvente. Espera-se que este livro sirva como referência para novas pesquisas e aplicações tecnológicas, incentivando o desenvolvimento de soluções sustentáveis para a remediação de derramamentos de petróleo e a valorização de resíduos agroindustriais.

Boa leitura!

SUMÁRIO

Apresentação 06

Capítulo 1: O petróleo e derramamentos em ambientes marinhos 09

1.1. O petróleo como recurso estratégico 09

1.2. Petróleo: origem, composição e importância 10

1.3. Propriedades físico-químicas do petróleo 11

Grau API (º API) 11

Ponto de fluidez 13

1.4. Derramamento de petróleo em ambientes marinhos 13

1.5. Impactos ambientais dos derramamentos 16

Capítulo 2: Estratégias de resposta e biossorção 18

2.1. Estratégia de resposta ao derramamento de petróleo 18

2.2. Remoção manual 18

2.3. Barreiras de contenção e *skimmers* 19

2.4. Dispersantes químicos 20

2.5. Queima *in situ* 20

2.6. Materiais sorventes 21

2.7. Fundamentos da sorção 22

2.8. Biossorção 23

Capítulo 3: A fibra de coco *in natura* como biossorvente para derramamentos de petróleo 24

3.1. Biomassa lignocelulósica 24

3.2. A fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) 25

3.3. Estrutura e composição da fibra de coco 26

Lignina 27

Celulose 28

Hemicelulose 29

Capítulo 4: Caracterização da fibra de coco *in natura* 31

4.1. Introdução 31

4.2. Caracterização química por espectroscopia no infravermelho (FTIR) 31

4.3. Caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) 33

4.4. Relação entre estrutura e biossorção 34

SUMÁRIO

Capítulo 5: Biossorção de petróleo utilizando fibras de coco *in natura* 36
5.1. Introdução 36
5.2. Caracterização do petróleo utilizado 36
5.3. Preparação das fibras para o ensaio de biossorção 37
5.4. Avaliação da capacidade de biossorção 38
5.5. Desempenho das fibras de coco 39
5.6. Aplicabilidade das fibras 40

Capítulo 6: Cinética de biossorção de petróleo por fibras de coco *in natura* 41
6.1. Introdução 41
6.2. Avaliação experimental da cinética 41
6.3. Comportamento cinético da fibra de coco 42

Capítulo 7: Equilíbrio de biossorção de petróleo pelas fibras de coco *in natura* 46
7.1. Introdução 46
7.2. Avaliação experimental do equilíbrio da biossorção 46
7.3. Comportamento do equilíbrio da biossorção 47

Capítulo 8: Perspectivas para o uso da fibra de coco na resposta a derramamentos de petróleo 50

Referências 51

CAPÍTULO

01 O petróleo e derramamentos em ambientes marinhos

1.1. O PETRÓLEO COMO RECURSO ESTRATÉGICO

Ao longo das últimas décadas, o petróleo consolidou-se como um dos recursos naturais de maior relevância para o desenvolvimento econômico e tecnológico da sociedade. Além de desempenhar papel fundamental na matriz energética mundial, esse recurso constitui a principal matéria-prima para a produção de combustíveis, lubrificantes, solventes, fertilizantes, medicamentos, cosméticos, plásticos, fibras sintéticas e inúmeros outros produtos indispensáveis às atividades industriais e ao cotidiano da população (SRINIVASAN; VIRARAGHAVAN, 2008; WANG; ZHENG; WANG, 2013). Sua elevada densidade energética, facilidade de transporte e ampla infraestrutura de exploração, refino e distribuição fazem com que o petróleo permaneça, ainda hoje, como um dos pilares da economia global.

Nas últimas décadas, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa impulsionaram a transição energética, caracterizada pela expansão das fontes renováveis e pelo aumento da eficiência energética. Entretanto, embora essa transformação venha modificando gradualmente a matriz energética global, o petróleo permanece indispensável para diversos setores estratégicos, especialmente os transportes marítimo e aéreo, a indústria petroquímica e a produção de insumos químicos. De acordo com a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA) (2025), a demanda mundial por petróleo deverá apresentar desaceleração gradual nas próximas décadas, porém continuará elevada devido, principalmente, ao crescimento da indústria petroquímica e das economias emergentes, evidenciando que esse recurso continuará exercendo papel estratégico durante o processo de transição energética.

Paralelamente ao crescimento das atividades de exploração, produção, transporte e armazenamento de petróleo, especialmente em ambientes offshore, aumentou também a complexidade operacional da indústria petrolífera. A exploração em águas profundas e ultraprofundas permitiu o acesso a importantes reservas de hidrocarbonetos, como as encontradas na margem continental brasileira, mas também ampliou os desafios relacionados à segurança operacional e à prevenção de acidentes. Embora os avanços tecnológicos tenham contribuído para reduzir a frequência dos grandes derramamentos, vazamentos de petróleo ainda ocorrem em diferentes etapas da cadeia produtiva, ocasionando impactos ambientais, econômicos e sociais que podem persistir por décadas, principalmente em ecossistemas costeiros sensíveis.

Nesse contexto, compreender as propriedades físico-químicas do petróleo constitui etapa fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de resposta a derramamentos. Características como composição química, densidade, grau API, viscosidade e ponto de fluidez influenciam diretamente o comportamento do óleo no ambiente, afetando processos como espalhamento, evaporação, emulsificação, dispersão e intemperismo. Consequentemente, essas propriedades determinam a eficiência das diferentes tecnologias empregadas na contenção, recuperação e remediação de áreas contaminadas (LOPES et al., 2007; WANG; ZHENG; WANG, 2013). Assim, antes de abordar os impactos ambientais decorrentes dos derramamentos e as técnicas utilizadas para sua mitigação, torna-se essencial compreender a natureza do petróleo e os fatores que governam seu comportamento em ambientes marinhos.

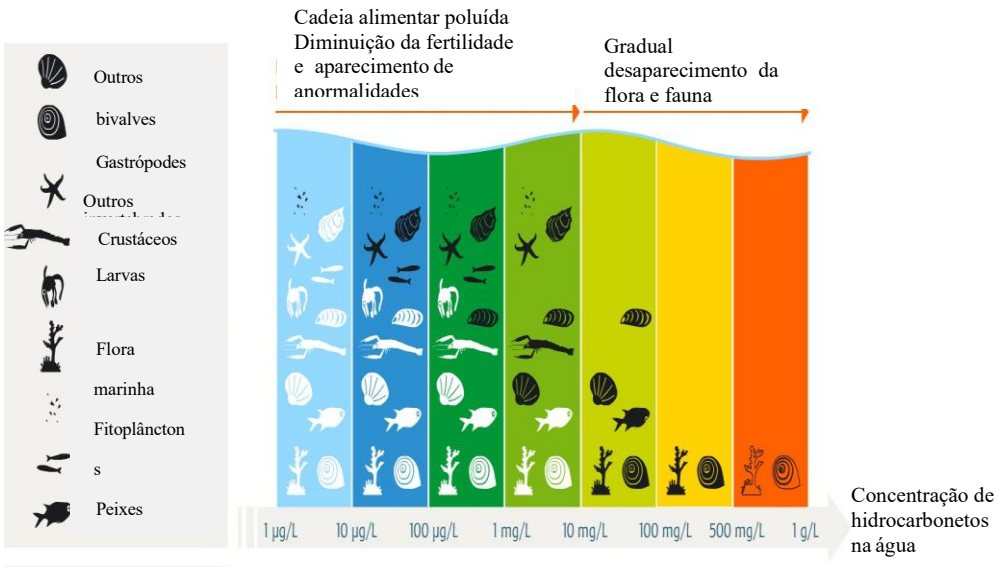
1.2. PETRÓLEO: ORIGEM, COMPOSIÇÃO E IMPORTÂNCIA

O petróleo é um recurso natural de grande importância para a economia mundial, seja como fonte de energia ou como matéria-prima para diversos produtos de uso cotidiano (SRINIVASAN, VIRARAGHAVAN, 2008). Essa substância é formada por uma mistura complexa de hidrocarbonetos e outros compostos químicos como os NSO's (nitrogênio, enxofre e oxigênio), contendo traços de vanádio, níquel, sódio, cobre e urânio (PETROBRAS, 1984; WANG, ZHENG, WANG, 2013, YANG et al., 2022).

Os hidrocarbonetos que constituem o petróleo podem ser classificados mediante sua estrutura molecular subdividindo-os em aromáticos e saturados. Os hidrocarbonetos saturados (alcanos ou parafínicos) são aqueles formados apenas por ligações simples. Já as cadeias dos hidrocarbonetos aromáticos são constituídas por ligações simples e duplas alternadas estruturadas em anéis com seis átomos de carbono, denominados benzenos. Quando os núcleos benzênicos se agrupam, formam outros compostos de hidrocarbonetos polinucleares ou também denominados poliaromáticos ou hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Esta classe apresenta estabilidade e uma relativa insolubilidade em água (LANZILLOTTA, 2008; PETROBRAS, 1984; REYES *et al.*, 2014).

Os HPAs possuem dois ou mais anéis, e podem ser formados a partir das fontes pirolíticas e petrogênicas. Eles são extremamente tóxicos ao meio ambiente e à saúde dos seres vivos (RAMIREZ *et al.*, 2017). Além disso, são poluentes persistentes e podem exigir décadas para sua total remoção do meio atingido (ALLAN, SMITH; ANDERSON, 2012). A Figura 1 apresenta os riscos ecotoxicológicos que esses contaminantes trazem ao meio ambiente ressaltando que uma grande concentração de petróleo no meio ambiente marinho estimula o decrescimento na fertilidade e um crescente aparecimento de anomalias presentes dos seres na região, chegando a uma determinada concentração que ocorre o desaparecimento gradual da flora e fauna.

Figura 1- Riscos ecotoxicológicos dos hidrocarbonetos ao meio ambiente.



Fonte: Adaptado de Hyland, Schneider (1976).

A necessidade da análise e o conhecimento das propriedades e características do petróleo são imprescindíveis na remoção deste contaminante oriundo de um derramamento. Deve ser estudada a densidade, densidade relativa, grau API e ponto de fluidez, bem como análises químicas e laboratoriais das concentrações de HPA no ambiente. Assim o melhor conhecimento das características deste óleo, asseguraria melhores resultados na limpeza, e poderia evitar possíveis danos não só à comunidade marinha, mas também para a equipe de combate responsável pela retirada deste composto, adequando um melhor procedimento de limpeza para cada derramamento em questão (LOPES *et al.*, 2007).

1.3. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO PETRÓLEO

GRAU API (º API)

Fisicamente, um petróleo pode ser mais ou menos leve, ou mais ou menos fluido, segundo o teor de cada uma das frações geoquímicas (REYES, 2015). A mistura e composição de hidrocarbonetos permite classificar os petróleos através da existência de grau API ou densidade API (*American Petroleum Institute*), sobretudo os valores variam para cada órgão, evidenciados na Tabela 1 (GUZMÁN-OSORIO *et al.*, 2019; SOUSA JUNIOR, 2009).

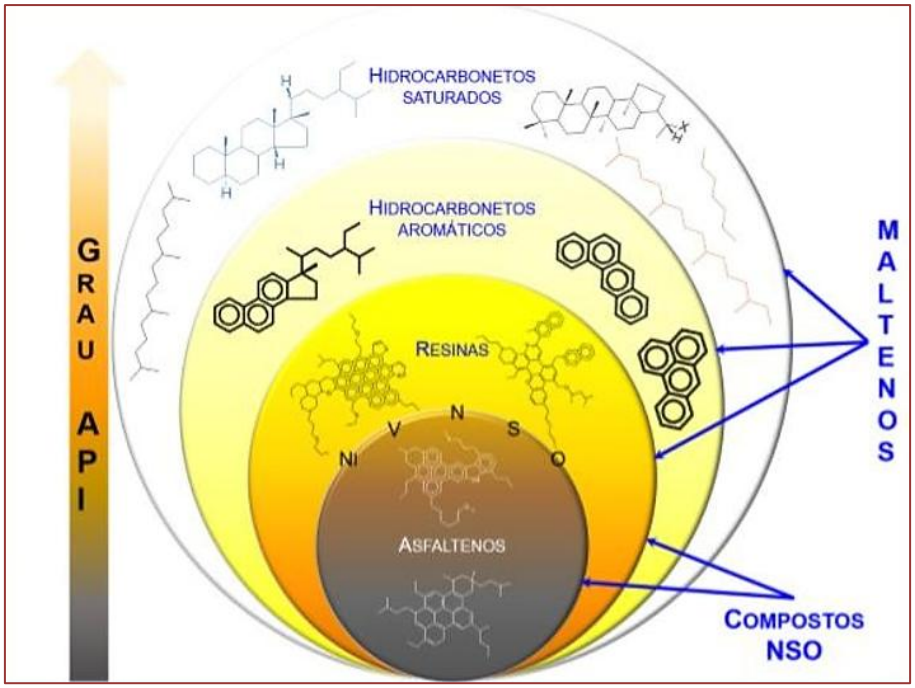
Tabela 1 – Classificação dos tipos de óleos em órgãos distintos.

Órgão	ºAPI (grau API)			
	Óleo Leve	**Óleo Médio**	**Óleo Pesado**	**Óleo Ultrapesado**
Alberta Government/ Canadá	≥ 34	25 – 34	10 – 25	≤10
U.S. Department of Energy	≥ 35,1	25 – 35,1	10 – 25	≤ 10
OPEP	≥ 32	26 – 32	10,5 – 26	≤ 10,5
PETROBRAS *offshore*	≥ 32	19 – 32	14 – 19	≤ 14
PETROBRAS *onshore*	≥ 32	18 – 32	13 – 18	≤ 13
ANP/Brasil	≥ 31,1	22,3 – 31,1	12 – 22,3	≤ 12

Fonte: Adaptado de Sousa Junior (2009).

Um petróleo leve de elevado ºAPI contém um alto percentual de hidrocarbonetos saturados, como mostrado na Figura 2. São considerados leves quando o ºAPI for elevado (maior que 30). Quando o óleo contém em sua estrutura, além dos alcanos, uma quantidade de hidrocarbonetos aromáticos variando de 25 a 30%, este óleo é considerado mediano, tendo um ºAPI relativamente menor do que o leve (de 22 a 30). O petróleo é chamado de pesado quando contém um ºAPI baixo (< 22) e o seu arranjo é formado basicamente por hidrocarbonetos aromáticos (BARRAGAN, 2012; SOUSA JUNIOR, 2009). Os óleos de menor grau API apresentam maior densidade e, de maneira geral, maior proporção de frações pesadas, incluindo resinas e asfaltenos, embora sua composição varie significativamente entre diferentes petróleos.

Figura 2- Variação do ºAPI segundo a variação das proporções geoquímicas do petróleo.



Fonte: Reyes (2015).

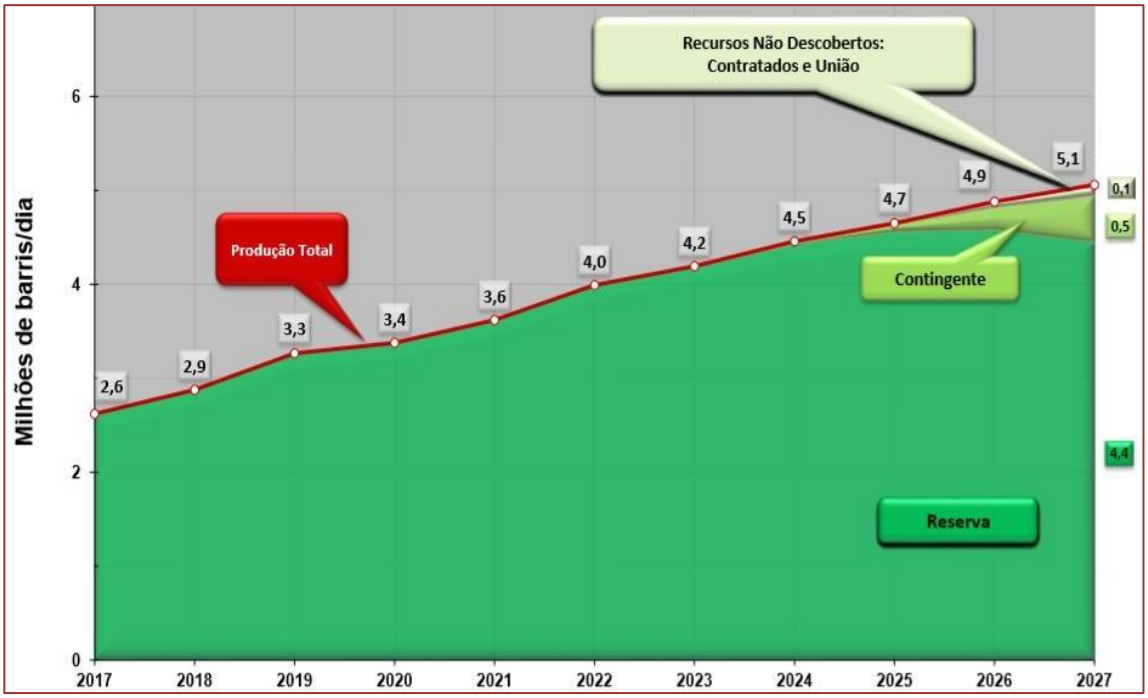
PONTO DE FLUIDEZ

Ponto de fluidez é a menor temperatura onde ainda é possível fazer escoar um fluido quando sujeito ao resfriamento em função da taxa de cisalhamento oriunda de seu próprio peso. Ele estabelece as condições de manuseio do produto e influencia diretamente na taxa de espalhamento e espessura das manchas de óleo no mar. O comportamento de fluidez de petróleo está fortemente relacionado à composição, especialmente ao comportamento de frações parafínicas/cerosas, além de outros fatores (ANP, 1999).

1.4. DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO EM AMBIENTES MARINHOS

A produção do petróleo *offshore* demanda um grande cuidado, uma vez que pode se tornar agressiva aos recursos naturais e as comunidades ecológicas. A Figura 3 mostra um aumento da produção diária do petróleo até o ano de 2027, realçando que ele é considerado a principal fonte de energia primária no mundo e esse consumo irá se manter no topo da matriz energética até 2050 (EPE, 2018).

Figura 3– Previsão da produção diária do petróleo nacional.



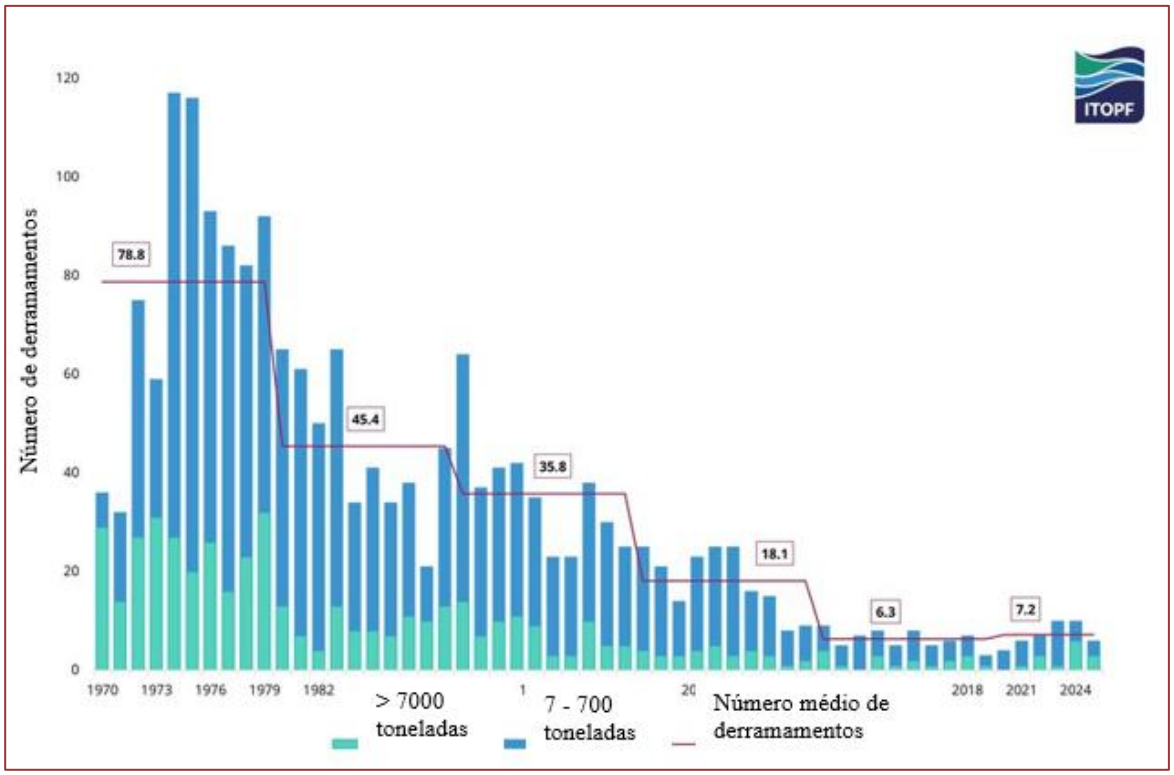
Fonte: EPE (2018)

Essa crescente produção diária do petróleo tende a possibilidades de ocorrerem um derramamento de óleo, destacando: acidentes com navios petroleiros, explosões de poços, acidentes nas plataformas, embarcações despreparadas, limpezas de tanques de embarcação, transporte ou armazenamento de petróleo e seus derivados. Uma grande quantidade de petróleo são transportadas anualmente através do mar, diante desta crescente demanda das atividades petrolíferas em ambientes marinhos, isso torna o petróleo e seus derivados os maiores produtos de contaminação deste ecossistema (EL-

DIN *et al.*, 2018; PAGNUCCO, PHILLIPS, 2018).

Segundo a *International Tanker Owners Pollution Federation* - ITOPF (2025), mais de 10.000 incidentes já foram constatados desde 1970. No entanto, ao longo do último meio século, as estatísticas de grandes derramamentos (>700 toneladas) vêm decrescendo de forma significativa, apesar do aumento nos riscos de vazamentos em consequência do crescente atividades petroleiras. Na Figura 4 apresenta essa redução quando comparada em décadas.

Figura 4– Número de derrames de navios-tanque de médio (7-700 toneladas) e grande (>700 toneladas), 1970-2025.



Fonte: Adaptado de ITOPF (2025).

De acordo com a Figura 4, durante a década de 1970, foram registrados, em média, 78,8 derramamentos por ano, refletindo um período de intensa expansão do transporte marítimo de petróleo associado a menores padrões de segurança operacional. Na década de 1980, essa média caiu para 45,4 derramamentos anuais, reduzindo-se para 35,8 na década de 1990 e para 18,1 entre 2000 e 2009. A partir de 2010, observa-se uma redução ainda mais acentuada, com média de 6,3 derramamentos anuais entre 2010 e 2019. No período mais recente (2020–2025), a média permaneceu baixa, em 7,2 derramamentos por ano, demonstrando que, embora os acidentes ainda ocorram, sua frequência é significativamente inferior à observada nas décadas anteriores.

O controle maior sobre os recorrentes derramamentos de petróleo atribui-se a preocupação mais acentuada das empresas petrolíferas bem como da sociedade voltada ao meio ambiente e seus recursos. Um maior conhecimento sobre as técnicas da exploração, transporte e armazenamento desse óleo, tem sido buscado. Entretanto, a

média de vazamentos por ano ainda é grande, o que requer uma busca contínua por métodos de aprimoramentos de técnicas remediadoras para uma minimização dos impactos causados nos ecossistemas costeiros (CANTAGALLO *et al.*, 2007; CALDAS, VIANA, SANTOS, 2017; IFELEBUEGU *et al.*, 2015; MOREIRA, 2014).

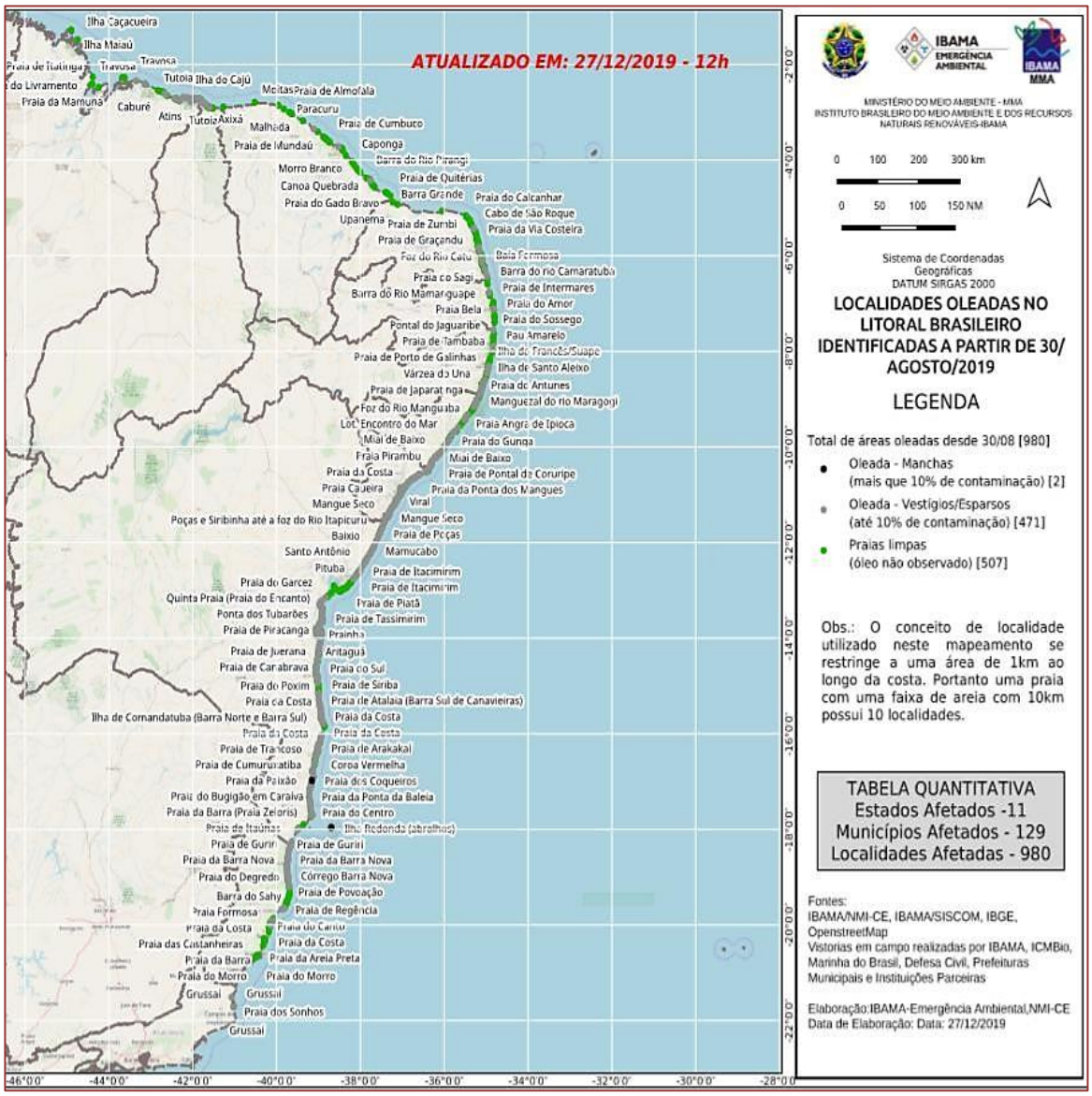
A maior liberação de petróleo acidentalmente no mundo ocorreu em 2010, a partir de uma explosão na plataforma de perfuração de poços de petróleo *Deepwater Horizon Macondo* que em seguida afundou no Golfo do México. Foi liberado cerca de 4,9 milhões de barris de petróleo no ambiente marinho, com consequência de 11 trabalhadores mortos e grandes impactos ambientais e socioeconômicos, que ainda são sentidos atualmente (ITOPF, 2012; NOAA, 2019).

Entre os primeiros grandes episódios registrados no Brasil, está o derramamento de petróleo através do navio Sinclair Petrolore em 1960, com vazamento estimado em 66.530 m^3 de petróleo para o mar, após ter explodido e afundado próximo da Ilha de Trindade (ES). Na década de 1970 três derrames de grande magnitude, tanto em volume vazado como em áreas atingidas, ocorreram no Brasil. Os petroleiros *Takimyia Maru* (1974) e *Brazilian Marina* (1978) no Canal de São Sebastião em São Paulo e o petroleiro *Tarik Ibn Zyiad* (1975) na Baía da Guanabara no Rio de Janeiro, com 6.000 toneladas de petróleo derramados em cada um deles (POFFO, 2002).

O rompimento do oleoduto na Baia da Guanabara em 2000, entre a Refinaria Duque de Caxias e o Terminal da Ilha d´Água, foi o segundo vazamento de óleo de maior repercussão nos meios de comunicação com 1.300 m^3 de óleo cru derramado no ambiente marítimo, causando a contaminação de praias, costões, manguezais, unidades de conservação e patrimônio histórico. A explosão seguida de incêndio do navio químico Vicuña, no Porto de Paranaguá (PR) foi um outro acidente de grande impacto ambiental, do qual se estima que vazaram 285 toneladas de óleos com 170 quilômetros da Baía de Paranaguá afetados (CETESB, 2015; POFFO, 2002).

No entanto, o recente acidente na costa brasileira (2019), foi o maior acidente de vazamento de petróleo no Brasil. As primeiras manchas começaram a ser identificadas no dia 02 de setembro, e a partir daí começaram a se estender ao longo de uma faixa de 2880 quilômetros, como pode ser observado na Figura 4, sendo considerada a maior contaminação em relação à extensão de área impactada no mundo (IBAMA, 2019).

Figura 4 – Mapa com locais afetados pelo óleo no litoral brasileiro em 2019.



Fonte: IBAMA (2019)

Nesse acidente brasileiro foram afetados com petróleo 980 locais em três meses, com 159 animais oleados (aves, tartarugas marinhas, mamíferos marinhos e outros). Desses animais afetados, 113 foram mortos, além de consequências negativas às atividades da pesca, do extrativismo e do turismo da região (IBAMA, 2019). Regiões sensíveis, como os manguezais, costões rochosos e recifes de corais, que são ecossistemas costeiros brasileiros que possuem uma grande diversidade de espécies (MOREIRA, 2014), foram afetados pelo óleo. A partir daí tornou-se um desafio no desenvolvimento e melhoria de tecnologias para minimizar os impactos gerados, além de remediar as áreas afetadas.

1.5. IMPACTOS AMBIENTAIS DOS DERRAMAMENTOS

Os derramamentos de petróleo figuram entre os acidentes ambientais de maior preocupação em ambientes marinhos devido à sua capacidade de provocar impactos ecológicos, econômicos e sociais de curta e longa duração. Após atingir a superfície da água, o petróleo sofre uma série de transformações físicas, químicas e biológicas, conhecidas como processos de intemperismo (*weathering*), que incluem espalhamento, evaporação, dissolução, dispersão, emulsificação, foto-oxidação, sedimentação e biodegradação. Esses processos alteram continuamente as propriedades do óleo e influenciam sua persistência no ambiente, bem como a eficiência das técnicas empregadas em sua contenção e remoção (YANG et al., 2022).

Além dos efeitos físicos, a composição química do petróleo representa um importante fator de risco para os ecossistemas. Entre seus constituintes, destacam-se os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), compostos reconhecidos por sua elevada persistência ambiental, potencial de bioacumulação e toxicidade para diversos organismos. A exposição aos HPAs pode provocar alterações fisiológicas, reprodutivas e comportamentais, além de efeitos mutagênicos e carcinogênicos, comprometendo populações inteiras e afetando o equilíbrio dos ecossistemas marinhos (RAMIREZ et al., 2017).

Os impactos ambientais variam de acordo com as características do petróleo e com a sensibilidade do ambiente atingido. A formação de uma película de óleo sobre a superfície da água reduz a penetração da luz solar e dificulta as trocas gasosas entre a atmosfera e o oceano, comprometendo a fotossíntese do fitoplâncton e de outros organismos fotossintetizantes. Como consequência, ocorre redução da produtividade primária e alterações que podem se propagar por toda a cadeia alimentar. Ecossistemas costeiros, como manguezais, recifes de corais, costões rochosos e praias arenosas, são particularmente vulneráveis, podendo permanecer contaminados por longos períodos devido à retenção do óleo em sedimentos e estruturas naturais (VIJAYANAND et al., 2023).

A fauna marinha também é severamente afetada. Aves, mamíferos, tartarugas, peixes, moluscos e crustáceos podem sofrer tanto os efeitos do contato direto com o petróleo quanto da ingestão de organismos contaminados. Em aves marinhas, por exemplo, o óleo reduz a impermeabilidade das penas e compromete a capacidade de isolamento térmico e de voo. Nos manguezais, a deposição de petróleo sobre os pneumatóforos dificulta as trocas gasosas das plantas, enquanto em recifes de corais e bancos de fanerógamas marinhas o óleo interfere na fotossíntese, no crescimento e na sobrevivência dos organismos, provocando alterações ecológicas que podem persistir por vários anos (VENKATRAMAN et al., 2024).

Além dos danos ambientais, os derramamentos de petróleo acarretam importantes impactos socioeconômicos. A contaminação de praias e áreas costeiras compromete atividades como turismo, pesca e mariscagem, afetando diretamente comunidades que dependem desses recursos para sua subsistência. Os elevados custos associados às operações de contenção, limpeza e recuperação ambiental, somados ao tempo necessário para a restauração dos ecossistemas, evidenciam a importância da prevenção e da rápida resposta a esses acidentes (OLIVEIRA et al., 2020). Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias eficientes, sustentáveis e de baixo custo para remoção do petróleo torna-se essencial para minimizar os danos ambientais, tema que será abordado nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO

02 Estratégias de resposta e biossorção

2.1. ESTRATÉGIA DE RESPOSTA AO DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO

A escolha da estratégia de resposta a derramamentos de petróleo depende das características do óleo, das condições ambientais, da sensibilidade do ecossistema afetado e da disponibilidade de recursos operacionais. Dessa forma, não existe uma tecnologia universalmente aplicável, sendo comum a utilização de abordagens integradas que combinem métodos físicos, químicos e biológicos para maximizar a eficiência da remediação e minimizar os impactos ambientais (CANTAGALLO et al., 2007; GONG et al., 2014).

Embora todas as tecnologias de resposta apresentem vantagens e limitações, a seleção da técnica mais adequada deve considerar aspectos como eficiência de remoção, tempo de resposta, custo operacional, logística de aplicação e possíveis impactos secundários ao ambiente. Assim, busca-se empregar métodos capazes de remover a maior quantidade possível de petróleo com o menor impacto ambiental e socioeconômico (LOPES et al., 2007).

De modo geral, as estratégias de resposta podem ser agrupadas em métodos físicos e mecânicos, químicos e biológicos. Entre as principais técnicas empregadas destacam-se a remoção manual, as barreiras de contenção e os skimmers, os dispersantes químicos, a queima *in situ* e a utilização de materiais sorventes, cada uma indicada para diferentes cenários de derramamento.

2.2. REMOÇÃO MANUAL

A remoção manual é um método que tem uma das principais prioridades na remediação de espaços menos disponíveis, como costões rochosos, e áreas mais sensíveis, não resistentes a consequentes efeitos oriundos de mecanismos mais rigorosos, como praias. Esta técnica utiliza materiais como rodos, pás, latas, baldes, carrinhos de mão, tambores etc. na retirada do óleo derramado e requer dos trabalhadores a utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) específicos. Consiste em um método trabalhoso e requer mais tempo, entretanto é a escolha mais apropriada, pois causa poucos danos ao meio ambiente (LOPES *et al.*, 2007; CETESB, 2015). Essa técnica foi a mais utilizada no derramamento de petróleo da costa brasileira (Figura 1), por principalmente trabalhadores empregados pelos municípios e voluntários locais (ITOPF, 2019).

Figura 1– Trabalhadores atuando com a remoção manual de óleo cru na praia de Salvador, Brasil 2019.

Fonte: Própria

2.3. BARREIRAS DE CONTENÇÃO E *SKIMMERS*

As barreiras de contenção (Figura 2) são utilizadas para conter ou desviar a mancha de óleo, enquanto os skimmers são empregados na recuperação do óleo concentrado na superfície. Esses métodos são os principais na etapa inicial da remediação de áreas costeiras impactadas, tornando-os indispensáveis na redução das contaminações de outras áreas (CETESB, 2015; LOPES *et al.*, 2007; TESTOLIN *et al.*, 2019).

Junto às barreiras, são utilizados equipamentos, como *skimmers*, barcaças recolhedoras, cordas oleofílicas entre outros, com intuito de remover o poluente. Diante da diversidade de barreiras e recolhedores, a escolha mais apropriada é feita através do conhecimento do local, características do óleo derramado e rapidez na remoção (LOPES *et al.*, 2007).

Figura 2– Barreiras apropriadas para recolhimento de óleos em lâminas tênues de aspecto iridescente a prateado.

Fonte: CETESB (2015).

2.4. DISPERSANTES QUÍMICOS

Os dispersantes químicos constituem uma das estratégias empregadas na resposta a derramamentos de petróleo em ambiente marinho, sendo utilizados com o objetivo de promover a dispersão do óleo na coluna d'água. Essas formulações são compostas, principalmente, por agentes tensoativos e solventes, que reduzem a tensão interfacial entre o petróleo e a água, favorecendo a formação de pequenas gotículas de óleo. Esse processo aumenta a área superficial disponível para a ação de microrganismos degradadores e dos processos naturais de dispersão, podendo acelerar a biodegradação do contaminante em determinadas condições (Gong et al., 2014).

A aplicação de dispersantes é indicada apenas em situações específicas, devendo considerar fatores como o tipo de petróleo, o grau de intemperismo da mancha, as condições oceanográficas, a sensibilidade dos ecossistemas afetados e os potenciais impactos ambientais decorrentes da transferência do óleo da superfície para a coluna d'água. Dessa forma, sua utilização requer avaliação técnica criteriosa e integração aos planos de resposta a emergências ambientais (CONAMA, 2015).

Embora os dispersantes possam contribuir para reduzir a quantidade de óleo que atinge ambientes costeiros sensíveis, sua aplicação não promove a remoção do contaminante do ambiente, mas apenas modifica sua distribuição e comportamento ambiental. Por esse motivo, a decisão quanto ao seu emprego deve considerar o balanço entre os benefícios operacionais e os possíveis impactos ecológicos associados à maior exposição de organismos aquáticos ao óleo disperso (Gong et al., 2014).

2.5. QUEIMA *IN SITU*

Queima *in situ* consiste na queima controlada do óleo proveniente de acidentes marinhos no próprio ambiente do derrame ou nas redondezas, a partir de substratos combustíveis (Figura 3). Para a realização efetiva desta prática de limpeza com mínimos efeitos adversos, é imprescindível a análise criteriosa das propriedades e espessura da camada de óleo na superfície, estado hidrodinâmico do mar, condições climáticas, proximidade das áreas urbanas etc. A técnica funciona melhor quando o óleo está fresco e o clima relativamente calmo. Este procedimento deve ser realizado por equipes bem

preparadas para a garantia de melhores resultados (LOPES *et al.*, 2007; NOAA, 2019; US DEP OF DEFENSE, 2019).

Figura 3 – Queima *in situ* ocorrida no acidente do Golfo do México em 2010.

Fonte: *US Dept of Defense* (2019).

2.6. MATERIAIS SORVENTES

Os materiais sorventes contêm uma grande superfície de contato que permitem a interação com o óleo e são compostos pelos fenômenos da absorção e adsorção. Na adsorção, os solutos existentes em soluções líquidas ou gasosas são retidos na superfície dos sorventes. Já na absorção, o soluto é transferido de uma fase para outra e interpenetra na fase do sorvente (ANNUNCIADO, SYDENSTRICKER, AMICO, 2005).

Esses materiais podem ser classificados como sintético, mineral ou natural, na forma granulada ou ainda envolto por tecidos porosos. A escolha do adsorvente dependerá das propriedades do óleo, bem como o tipo de ambiente impactado. Os materiais considerados sintéticos são os mais comercializados atualmente. Eles são bastante eficientes, sobretudo por possuírem grande capacidade de sorção do óleo além de possuírem baixa densidade, que minimiza os riscos de afundar e se perder no oceano (BHARDWAJ, BHASKARWAR, 2018; ITOPF, 2014). Entretanto, muitos sorventes sintéticos são constituídos por polímeros de baixa biodegradabilidade e, após o uso, geram resíduos contaminados que precisam de destinação adequada.

Os materiais minerais e naturais estão mais disponíveis na natureza, reduzindo o custo das tecnologias de remediação com sorventes. No entanto, a limitação de adsorventes minerais e naturais decorre através de lançamento de parcelas altas deste material sem qualquer tipo de "embalagem", podendo gerar outros impactos adicionais aos organismos (IPIECA, 1995; LOPES *et al.*, 2007; CANTAGALLO *et al.*, 2007; CRAIG *et al.*, 2012).

O uso de materiais naturais tem como principais vantagens o baixo custo, baixa abrasividade, atoxicidade, baixa densidade, além de aspectos ecológicos e sociais, em razão da melhor reciclabilidade e biodegradabilidade (PESSÔA *et al.*, 2019; LUIS-ZARATE *et al.*, 2018).

Para o uso dessa tecnologia é necessário a total recuperação do material absorvente, sobretudo pelo perigo existente do produto se tornar uma fonte de contaminantes para as espécies habitantes. Sua prática deve ser manipulada entre as primeiras tecnologias apresentadas em um pequeno espaço de tempo para não ocasionar perturbações na comunidade biológica (IPIECA, 1995; LOPES *et al.*, 2007; CANTAGALLO *et al.*, 2007).

2.7. FUNDAMENTOS DA SORÇÃO

Sorção é um fenômeno físico-químico decorrente da interação de substâncias no interior ou na superfície de outras. Logo, sorção é um termo geral para indicar a absorção e adsorção. Absorção é um fenômeno em que a substância difunde dentro do próprio sólido da matriz porosa, sendo um fenômeno volumétrico. Na adsorção, o sorbato é retido na superfície do material por diferentes tipos de interação, incluindo forças de *van der Waals*, interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio, interações hidrofóbicas e, em determinados sistemas, ligações químicas (WEBER, MCGINLEY, KATEZ, 1991). A sorção é uma operação de transferência de massa, onde estuda a habilidade de certos sólidos concentraram substâncias tanto na sua superfície como no seu interior, possibilitando a separação de componentes de um fluido. Os efeitos da adsorção podem ser complexos, uma vez que possui uma diversidade de espécies químicas, fases e interfases comumente presentes em ambientes contaminados.

A adsorção tornou-se um método bastante usual para remover contaminantes orgânicos e inorgânicos de fluidos. Uma vez que os compostos que são adsorvidos concentram na superfície externa do material adsorvente, quanto maior for a superfície externa por unidade de massa sólida, maior será a adsorção. Logo, os adsorventes que possuem mais partículas porosas contêm maior área superficial externa disponível e, consequentemente, é mais favorável à adsorção (NASCIMENTO *et al.*, 2014). Segundo Silva (2000), os termos designados aos elementos que integram a adsorção são adsorvato ou absorvato, que é a espécie que se acumula na interface do material, adsorvente ou adsorbente, a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula, e adsortivo, que representa o fluido.

A adsorção resulta de uma variedade de forças intermoleculares entre o adsorvato e o adsorvente. A depender da natureza dessas forças de interação, a adsorção pode ser classificada como fisissorção ou quimissorção (FOGLER, 2009). Na fisissorção, ou adsorção física, a ligação entre o material adsorvente e o adsorvato é relativamente fraca e pode ser atribuída às forças de *Van der Waals*, o que torna o processo reversível. Além disso, as interações ocorrem em toda a superfície do adsorvente, tornando a adsorção física inespecífica.

No ponto de vista termodinâmico, o calor envolvido na fisissorção está abaixo de 10kcal/mol. Já na quimissorção, ou adsorção química, a interação é muito mais forte, uma vez que ocorre a troca ou partilha de elétrons entre as moléculas, caracterizando uma ligação química. Logo, o calor envolvido é na ordem do calor de reação, ou seja, acima de 20 kcal/mol. Além disso, nem todas as moléculas do adsorvato podem ser adsorvidas

quimicamente, sendo necessário um sítio ativo para ocorrer a ligação (MAGDALENA, 2010). Com isso, a adsorção química é altamente específica. Os mecanismos de sorção não são completamente independentes. A distinção em relação a espécie ser química ou fisicamente adsorvida não é muito clara e, muitas vezes, tanto a fisissorção como a quimissorção podem ocorrer.

2.8. BIOSSORÇÃO

Quando materiais de origem biológica são utilizados como sorventes, esse processo é denominado biossorção. Diferentemente dos sorventes sintéticos, os biossorventes são obtidos a partir de biomassa vegetal, animal ou microbiana, geralmente proveniente de resíduos agroindustriais ou de fontes renováveis. A utilização desses materiais tem despertado crescente interesse devido à elevada disponibilidade, ao baixo custo, à biodegradabilidade e ao reduzido impacto ambiental, características que os tornam alternativas promissoras para aplicações em remediação ambiental (ANNUNCIADO; SYDENSTRICKER; AMICO, 2005; IFELEBUEGU; MOMOH; CHU, 2015).

No caso da remediação de derramamentos de petróleo, a eficiência da biossorção está diretamente relacionada às características físico-químicas do biossorvente. Propriedades como baixa densidade, elevada porosidade, hidrofobicidade, oleofilicidade e alta área superficial favorecem a retenção do óleo e contribuem para a manutenção da flutuabilidade do material durante sua aplicação em ambientes aquáticos. Além disso, a composição lignocelulósica de muitos resíduos vegetais, rica em celulose, hemicelulose e lignina, fornece uma estrutura porosa e grupos funcionais capazes de interagir com diferentes frações do petróleo, aumentando a capacidade de sorção (CARDOSO et al., 2025a).

Entre os diferentes biossorventes estudados, a fibra de coco destaca-se pela elevada disponibilidade em países tropicais, baixo custo, resistência mecânica, alta concentração de lignina e excelente capacidade de flutuação, características que favorecem sua aplicação em ambientes marinhos. Nas últimas décadas, diversos estudos demonstraram o potencial desse material para a remoção de petróleo e seus derivados, tanto na forma in natura quanto após modificações físicas, químicas ou biológicas destinadas a potencializar sua capacidade de sorção (ANNUNCIADO; SYDENSTRICKER; AMICO, 2005; CARDOSO et al., 2025a).

Diante desse cenário, a biossorção consolidou-se como uma das estratégias mais promissoras para a resposta a derramamentos de petróleo, reunindo eficiência operacional, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender as propriedades dos materiais lignocelulósicos e os mecanismos responsáveis pelo seu desempenho como biossorventes. Entre esses materiais, a fibra de coco tem recebido destaque na literatura científica e constitui o objeto central de estudo desta obra, sendo abordada em detalhes no capítulo seguinte.

CAPÍTULO

03 A fibra de coco *in natura* como biossorvente para derramamentos de petróleo

3.1. BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

A crescente busca por tecnologias ambientalmente sustentáveis para resposta a derramamentos de petróleo impulsionou o desenvolvimento de materiais sorventes obtidos a partir de recursos renováveis. Entre as diferentes alternativas investigadas, os resíduos lignocelulósicos destacam-se por aliarem elevada disponibilidade, baixo custo, biodegradabilidade e bom desempenho na retenção de hidrocarbonetos. Essas características tornam esses materiais uma alternativa promissora aos sorventes sintéticos convencionalmente utilizados, contribuindo simultaneamente para a valorização de resíduos agroindustriais e para o desenvolvimento de estratégias de remediação alinhadas aos princípios da economia circular (ANNUNCIADO; SYDENSTRICKER; AMICO, 2005; IFELEBUEGU; MOMOH; CHU, 2015; CARDOSO et al., 2025a).

A biomassa lignocelulósica corresponde ao principal componente estrutural das plantas e é composta predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, polímeros naturais responsáveis por conferir resistência mecânica, estabilidade e características superficiais favoráveis aos processos de sorção. A proporção desses constituintes varia entre as espécies vegetais e influencia diretamente propriedades como porosidade, densidade, hidrofobicidade, oleofilicidade e área superficial, fatores determinantes para o desempenho desses materiais como biossorventes em ambientes aquáticos (NASCIMENTO et al., 2014).

Nas últimas décadas, diversos resíduos agrícolas e agroindustriais passaram a ser investigados para aplicação na remoção de petróleo e seus derivados, incluindo fibras de coco, paina (*kapok*), bagaço de cana-de-açúcar, serragem, casca de arroz, fibras de bananeira e resíduos de açaí. De maneira geral, esses materiais apresentam capacidade de sorção variável em função de suas características estruturais e da composição do petróleo, sendo comum a realização de modificações físicas, químicas ou biológicas com o objetivo de potencializar seu desempenho (ANNUNCIADO; SYDENSTRICKER; AMICO, 2005; IFELEBUEGU; MOMOH; CHU, 2015).

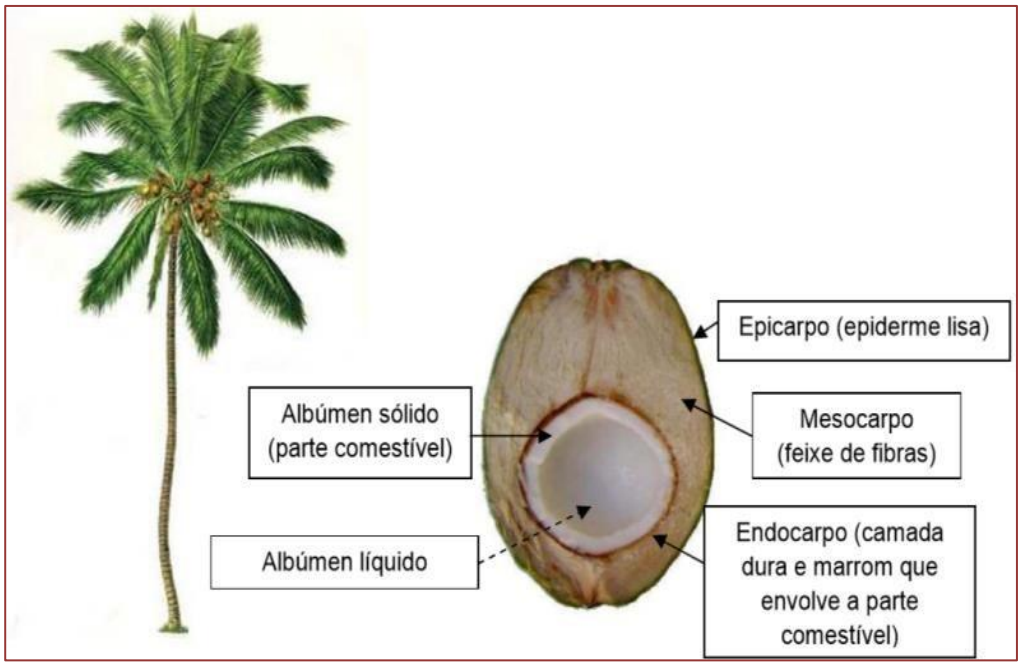
Entre os diferentes biossorventes lignocelulósicos, a fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) destaca-se a partir de diversos estudos para aplicações em derramamentos de petróleo. Sua elevada disponibilidade em regiões tropicais, associada à alta resistência mecânica, baixa densidade, elevada concentração de lignina e excelente capacidade de flutuação, faz desse material um candidato promissor para utilização em ambientes marinhos. Além disso, trata-se de um resíduo agroindustrial abundante, cuja valorização contribui para reduzir impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado e agregar valor a uma biomassa amplamente disponível (CARDOSO et al., 2025b).

Nesse contexto, este capítulo apresenta os principais aspectos relacionados à fibra de coco como biossorvente, abordando sua origem, composição química, estrutura lignocelulósica, propriedades físico-químicas e aplicações na remediação de derramamentos de petróleo. A compreensão dessas características constitui a base para interpretar os resultados experimentais apresentados nos capítulos subsequentes, dedicados à caracterização e ao desempenho da fibra de coco *in natura* (não funcionalizada/não modificada quimicamente) na biossorção de petróleo.

3.2. A FIBRA DE COCO (*Cocos nucifera* L.)

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é uma espécie tropical amplamente cultivada no mundo, encontrada em todas as regiões intertropicais. É membro da família *Arecaceae*, sendo a única espécie classificada no gênero *Cocos* com crescimento abundante na região tropical. Seu fruto é composto por três partes (Figura 1): epicarpo, mesocarpo e endocarpo (CHAKRABORTY, KARUM e MITRA, 2009). O epicarpo é a camada externa fina e lisa do fruto que envolve a camada intermediária, o mesocarpo, onde são retiradas as fibras. O endocarpo é uma camada lenhosa, dura e marrom que envolve a parte comestível e se encontra logo após o mesocarpo. É no interior desta camada que se encontra o albúmem sólido uma camada carnosa e branca que contém o albúmem líquido, conhecido como água de coco.

Figura 1 - Ilustração do coqueiro e corte longitudinal do coco com descrição das suas partes.



Fonte: Pedrosa et al. (2019).

O coqueiro é uma cultura típica de clima tropical, sendo cultivado em cerca de 90 países. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2026), foram plantados 187.164 hectares de área com 2.105.345 mil frutos produzidos somente no ano de 2024 no Brasil. A cultura do coqueiro apresenta grande potencial de exploração, uma vez que possui grande capacidade de adaptação a diferentes condições de clima e solo, além do que se presta muito bem ao cultivo consorciado com outras culturas, característica da maior importância para o pequeno produtor com limitada área de cultivo.

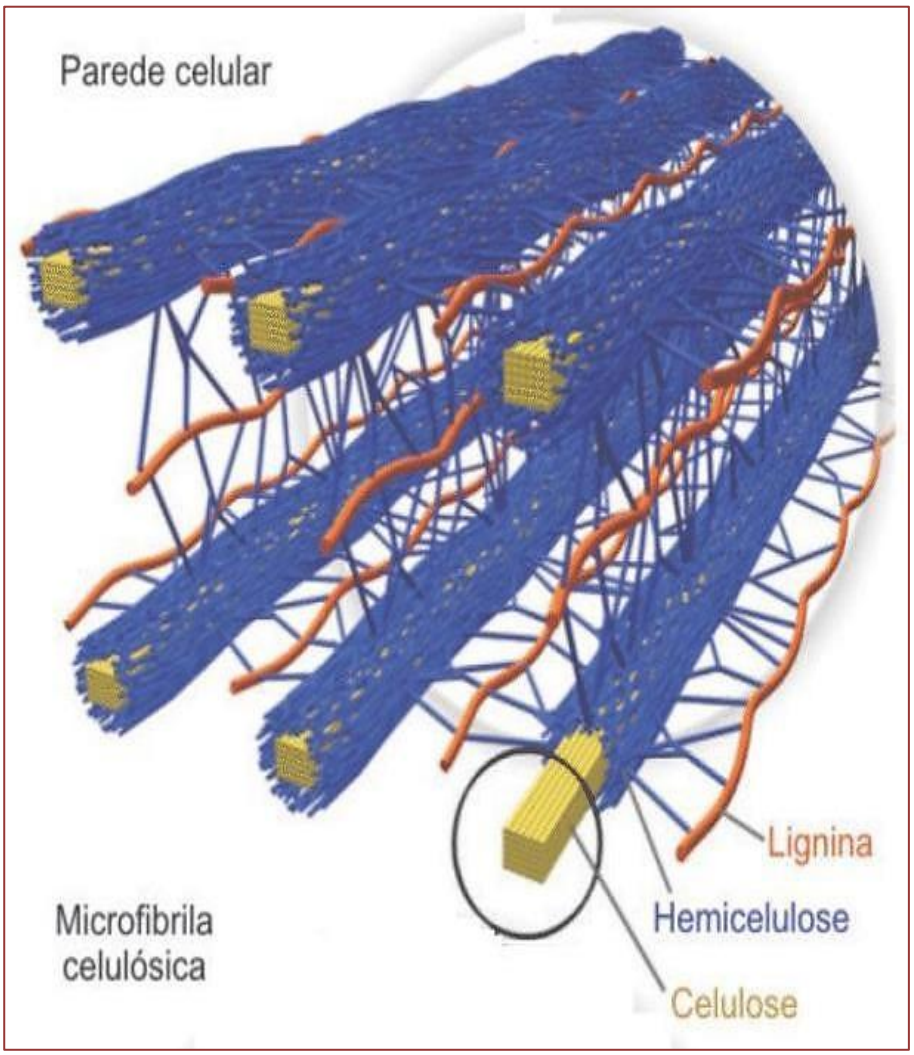
A maior parte da produção brasileira destina-se à indústria alimentícia, basicamente destinada ao consumo de água de coco. Esta prática gera uma grande quantidade de resíduos sólidos a partir dos rejeitos, onde de acordo com Cerqueira (2010), o consumo de 300 mL de água de coco resulta em aproximadamente um quilo e meio de casca de coco residual, que leva, em média, 8 a 12 anos para se decompor sendo normalmente enviados para lixões e aterros sanitários. Os resíduos sólidos descartados de maneira inadequada, além de contribuir para a poluição ambiental, coloca em risco a saúde da população, e contribui para a transmissão de doenças por meio de vetores, tais como: moscas, mosquitos, baratas e roedores, que encontram, fonte de alimento, abrigo e condições para seu desenvolvimento nestes resíduos.

Uma alternativa de reutilização dessas fibras residuais é empregar as fibras de coco como biossorventes de petróleo em acidentes. A fibra de coco é um material lignocelulósico, com uma superfície composta de poros que facilita a adsorção. Além disso, é biodegradável, possui baixo custo devido sua grande disponibilidade em forma de resíduos, não é abrasivo e possui baixa densidade, detendo grande capacidade no ponto de vista da sustentabilidade (CARDOSO et al., 2025a; CARDOSO et al., 2025b; KHAN, VIROJNAGUD e RATPUKDI, 2004; ANNUNCIADO, SYDENSTRICKER e AMICO, 2005; SANTOS, ALSINA e SILVA, 2007).

3.3. ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DA FIBRA DE COCO

A fibra de coco é um material lignocelulósico, constituído predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, além de apresentar menores proporções de extrativos, umidade e materiais minerais extrativos (SOARES *et al.*, 2016; SILVA, 2013; BARBOSA, 2011), conforme Figura 2. Esses componentes estruturais são responsáveis pelas propriedades mecânicas, químicas e superficiais da fibra, influenciando diretamente seu potencial de aplicação como biossorvente. A celulose e hemicelulose possuem estruturas com características hidrofílicas, no entanto a lignina é considerada um composto oleofílico.

Figura 2– Estrutura química dos materiais lignocelulósicos.

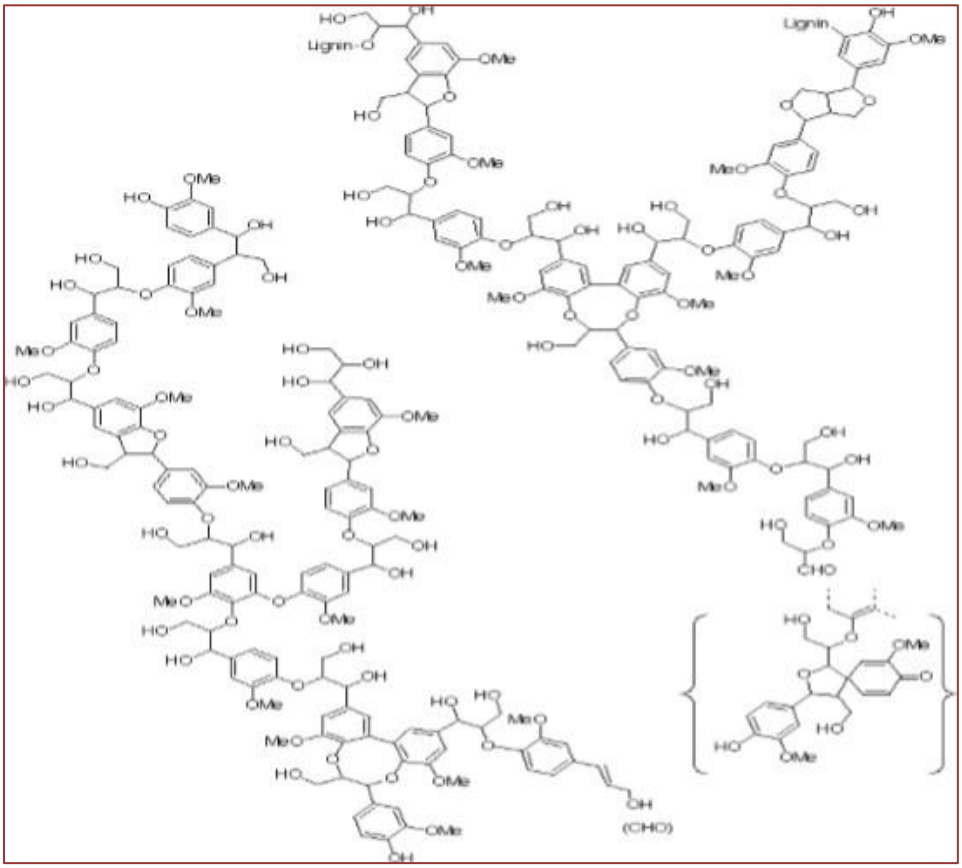


Fonte: Canilha (2010).

LIGNINA

A lignina é uma macromolécula amorfa que confere aos tecidos vegetais rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbianos e mecânico (GRABBER, 2005). A base estrutural da lignina é o fenilpropano, tendo ligado ao anel benzênico um número variável de grupos hidroxílicos e metoxílicos a partir de ligações éter (Figura 3). Essas ligações auxiliam na propriedade da lignina de impermeabilização da parede celular à água. Além disso, age como agente permanente de ligação entre a celulose e hemicelulose, formando a lignificação da fibra (CRESTINI *et al.*, 2010; MIRANDA *et al.*, 2019).

Figura 3– Estrutura molecular da lignina.

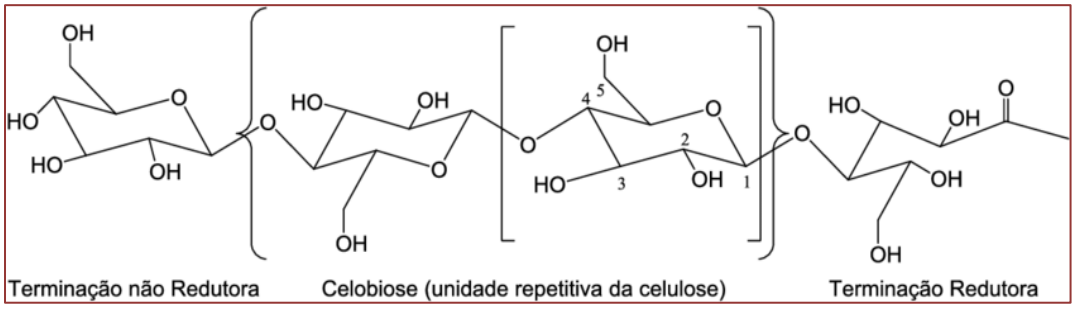


Fonte: Crestini *et al.* (2010).

CELULOSE

A celulose é um homopolímero constituído de monômeros de glicose. É o polímero orgânico mais abundante na natureza e o principal constituinte da parede celular vegetal. Ela é um polímero linear formado por resíduos de glicose conectados por ligações do tipo β-(1,4). A Figura 4 mostra a estrutura química da celulose.

Figura 4 – Estrutura química da celulose.



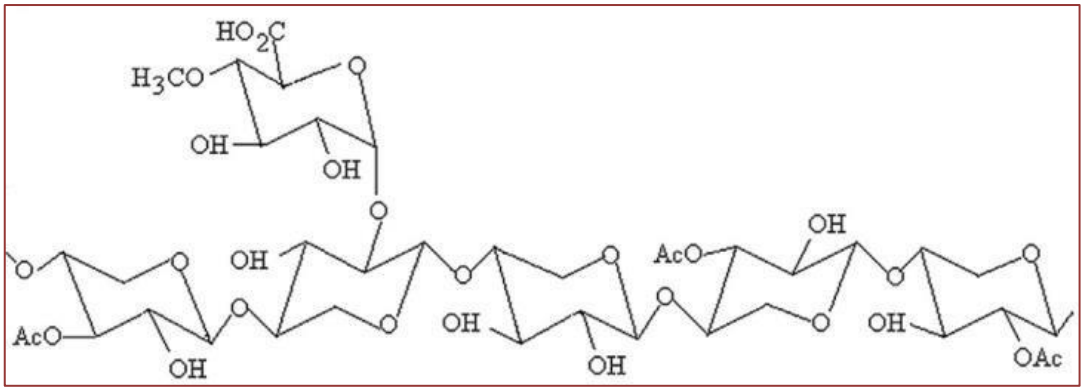
Fonte: Cordeiro (2016).

As moléculas de celulose formam ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares que conferem hidrofilicidade ao composto. A interação intramolecular é responsável por uma certa rigidez das cadeias unitárias, e a interação intermolecular, pela formação da fibra vegetal. Assim, as moléculas de celulose se alinham para formar as paredes celulares das fibras.

HEMICELULOSE

As hemiceluloses são heteropolímeros ramificados com baixa massa molecular, que estão em estreita associação com a celulose e a lignina nos tecidos vegetais. Elas constituem cerca de 20 a 30% das fibras, e são constituídas de vários tipos de unidade de açúcar (polioses), além de serem polímeros ramificados de cadeia mais curta em relação a celulose, mostradas na Figura 5 (MORRISON e BOYD, 1981).

Figura 5 – Estrutura química da hemicelulose.



Fonte: Thakur, Thakur (2014).

Na parede celular, as hemiceluloses estão associadas a vários componentes, como celulose, proteínas, pectina e lignina (SUN *et al.*, 2000). As hemiceluloses aderem fortemente à superfície das microfibrilas de celulose via ligações de hidrogênio, sendo sugerido que essa adesão evitaria a formação de fibrilas maiores de celulose por agregação lateral (ALBERSHEIM *et al.*, 2011). Essa interação com celulose forma as ligações não-covalentes. As hemiceluloses apresentam elevada afinidade por água e menor estabilidade térmica quando comparadas à celulose e à lignina, contribuindo para o comportamento higroscópico e para os processos de degradação da biomassa.

Em conjunto, celulose, hemicelulose e lignina determinam as propriedades físico-químicas e estruturais da fibra de coco, influenciando diretamente seu comportamento como biossorvente. Enquanto a celulose e a hemicelulose contribuem para a organização da parede celular e apresentam caráter predominantemente hidrofílico devido à presença de grupos hidroxila, a lignina confere maior hidrofobicidade, resistência mecânica e afinidade por compostos apolares, como os hidrocarbonetos presentes no petróleo. Dessa forma, a proporção entre esses constituintes, associada à porosidade e à morfologia superficial da fibra, desempenha papel fundamental na capacidade de retenção do óleo e na eficiência do processo de biossorção.

Além da composição química, as características morfológicas da fibra, como rugosidade superficial, distribuição de poros e organização estrutural da parede celular, também exercem influência significativa sobre a interação entre o biossorvente e o petróleo. Essas propriedades serão discutidas no capítulo seguinte, por meio da caracterização físico-química da fibra de coco *in natura*, permitindo compreender os mecanismos responsáveis pelo seu desempenho na biossorção.

CAPÍTULO

04 Caracterização da fibra de *coco in natura*

4.1. INTRODUÇÃO

A caracterização de um biossorvente constitui uma etapa fundamental para compreender os mecanismos responsáveis pela retenção de petróleo e pelo desempenho do material durante sua aplicação em ambientes aquáticos. Propriedades como composição química, morfologia superficial e grupos funcionais influenciam diretamente a interação entre a fibra e os hidrocarbonetos, determinando características como oleofilicidade, hidrofobicidade, área superficial disponível e estabilidade estrutural (CARDOSO et al., 2025a).

No caso da fibra de coco *in natura*, essas propriedades são consequência de sua estrutura lignocelulósica e da organização de seus constituintes químicos. A combinação entre elevada concentração de lignina, estrutura porosa e presença de grupos funcionais específicos faz desse material um biossorvente promissor para a remediação de derramamentos de petróleo.

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos da caracterização da fibra de coco *in natura*, correlacionando os resultados obtidos com as propriedades que favorecem sua aplicação como biossorvente.

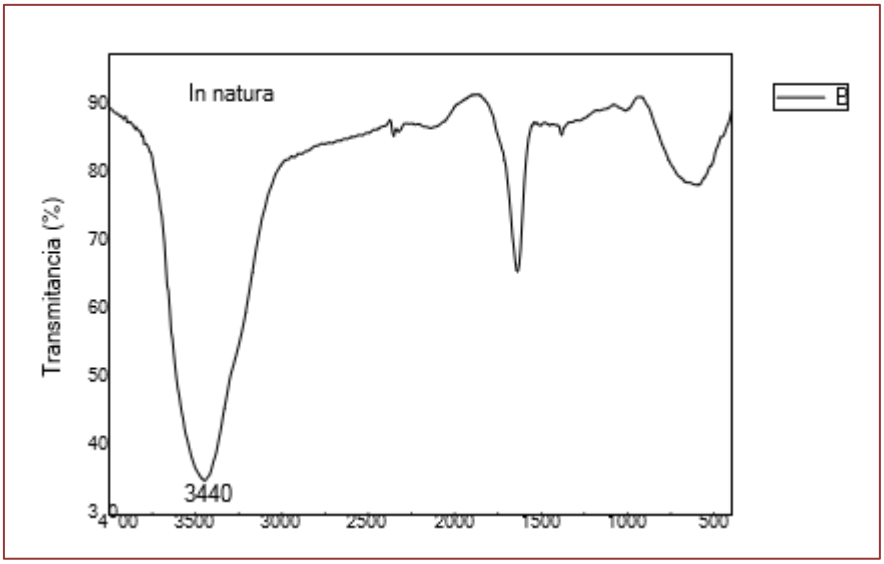
4.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR)

A espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para identificar os principais grupos funcionais presentes na fibra de coco in natura. Essa técnica permite caracterizar a estrutura química do material por meio da identificação das vibrações moleculares dos diferentes constituintes lignocelulósicos, sendo amplamente empregada na caracterização de fibras vegetais destinadas à aplicação como biossorventes.

Esse procedimento foi conduzido no equipamento de modelo IR Prestige-21 da marca Shimadzu, com uma faixa espectral de varredura de 4000 a 400 cm^{-1}, na forma de pastilhas diluídas em brometo de potássio de pureza espectroscópica (KBr). A Figura 1 apresenta os espectros das fibras de coco *in natura*, onde é possível verificar os grupos funcionais disponíveis.

Observa-se uma banda larga e intensa centrada em aproximadamente 3440 cm^{-1}, atribuída ao estiramento das ligações O–H presentes nos grupos hidroxila da celulose, hemicelulose e lignina. A elevada intensidade dessa banda confirma a abundância de grupos hidroxila na estrutura da fibra, característica típica de materiais lignocelulósicos. Esses grupos desempenham papel importante na organização da parede celular vegetal por meio da formação de ligações de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares, influenciando propriedades como resistência mecânica e afinidade com moléculas polares.

Figura 1 - FTIR das fibras de coco *in natura.*



Na região de aproximadamente 2920 cm^{-1}, observa-se uma banda associada ao estiramento das ligações C–H de grupos metileno e metila presentes nos constituintes lignocelulósicos. Essa absorção está relacionada principalmente às cadeias alifáticas da celulose e da hemicelulose, sendo frequentemente observada em fibras vegetais.

A banda intensa próxima de 1730 cm^{-1} é atribuída ao estiramento da carbonila (C=O), característica de grupos acetila e ésteres presentes principalmente na hemicelulose, além de compostos fenólicos da lignina. O conjunto de bandas é compatível com o espectro esperado para uma fibra lignocelulósica não submetida a modificação química deliberada.

Na região entre 1600 e 1510 cm^{-1} são observadas bandas relacionadas às vibrações do anel aromático da lignina. A presença dessas absorções confirma a elevada concentração desse polímero na fibra de coco, característica que a diferencia de muitas outras fibras vegetais. A lignina possui natureza predominantemente hidrofóbica e apresenta elevada afinidade por compostos orgânicos apolares, contribuindo significativamente para a interação da fibra com os hidrocarbonetos presentes no petróleo.

Também podem ser observadas bandas em torno de 1420–1370 cm^{-1}, associadas às deformações das ligações C–H da celulose e da hemicelulose, enquanto as absorções próximas de 1240 cm^{-1} correspondem ao estiramento das ligações C–O presentes na lignina e em grupos acetilados da hemicelulose. Na região entre 1030 e 1050 cm^{-1}, destaca-se uma banda atribuída ao estiramento C–O–C e C–O característico dos polissacarídeos, especialmente da celulose.

De modo geral, o espectro obtido confirma a presença dos três principais constituintes da biomassa lignocelulósica, como a celulose, hemicelulose e lignina, demonstrando que a fibra de coco *in natura* preserva sua estrutura química natural. A coexistência de grupos hidroxila, carbonilas, ligações éter e estruturas aromáticas resulta em uma superfície quimicamente heterogênea, capaz de estabelecer diferentes tipos de interação com o petróleo. Enquanto a lignina favorece a afinidade por hidrocarbonetos devido ao seu caráter mais hidrofóbico, a organização estrutural promovida pela celulose

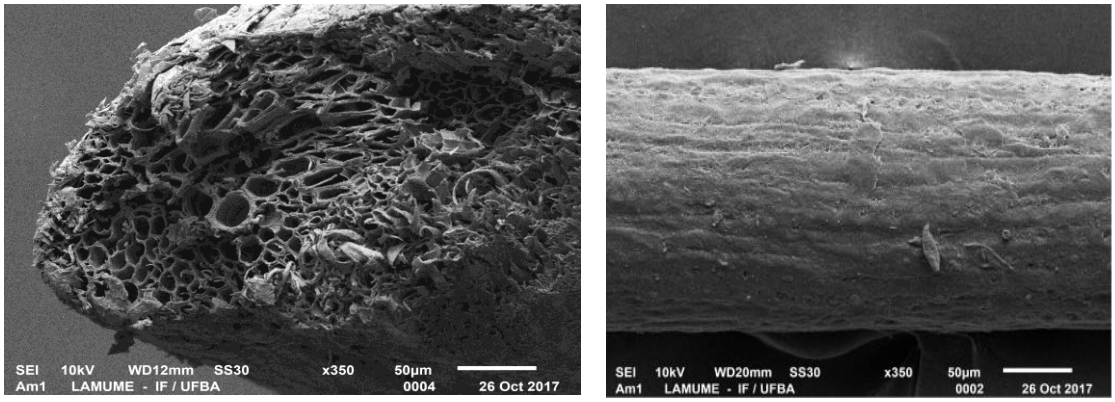
e pela hemicelulose confere estabilidade mecânica e mantém a integridade da fibra durante o processo de biossorção. Essas características justificam o amplo interesse pela fibra de coco como biossorvente em aplicações de remediação de derramamentos de petróleo.

4.3. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A morfologia superficial da fibra de coco *in natura* foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), técnica amplamente utilizada para caracterizar materiais lignocelulósicos devido à sua elevada resolução e capacidade de revelar detalhes da superfície e da estrutura interna das fibras. A análise morfológica é de grande importância para estudos de biossorção, pois características como rugosidade, porosidade e organização estrutural influenciam diretamente a interação entre o biossorvente e o petróleo.

A Figura 2 apresenta as micrografias obtidas para a fibra de coco *in natura*. Observa-se que a superfície da fibra apresenta elevada irregularidade, com aspecto rugoso e presença de cavidades e poros distribuídos ao longo da estrutura. A presença de irregularidades, cavidades e estruturas longitudinais pode favorecer a retenção física do óleo e ampliar a interface de contato entre a fibra e o contaminante.

Figura 2. Micrografias obtidas por MEV das fibras de coco *in natura* na vista geral evidenciando a extremidade (esquerda) e a superfície longitudinal (direita).



A rugosidade observada nas micrografias também representa uma característica importante para aplicações em derramamentos de petróleo. Superfícies irregulares aumentam o contato entre o biossorvente e o contaminante, favorecendo a retenção física do óleo e reduzindo sua remoção por ação das correntes e do movimento da água. Em conjunto, essas características estruturais contribuem para explicar o elevado desempenho da fibra de coco como biossorvente.

Resultados semelhantes foram descritos por Annunciado, Sydenstricker e Amico (2005), que atribuíram a elevada capacidade de sorção da fibra de coco à sua estrutura porosa e à elevada área superficial disponível para interação com o petróleo. Da mesma forma, Cardoso et al. (2025b) observaram que a combinação entre rugosidade superficial, porosidade e elevada concentração de lignina favorece a retenção de petróleo, tanto em escala laboratorial quanto em aplicações em campo, reforçando o potencial da fibra de coco para a remediação de derramamentos de petróleo.

Dessa forma, a análise por microscopia eletrônica de varredura evidencia que a fibra de coco apresenta uma morfologia compatível com materiais biossorventes, caracterizada por morfologia superficial irregular com cavidades aparentes. Essas características, associadas à sua composição lignocelulósica, justificam a elevada afinidade da fibra por hidrocarbonetos e explicam, em parte, sua eficiência na remoção de petróleo em ambientes marinhos.

4.4. RELAÇÃO ENTRE ESTRUTURA E BIOSSORÇÃO

A eficiência de um biossorvente é resultado da atuação conjunta de suas características químicas e estruturais. No caso da fibra de coco *in natura*, a composição lignocelulósica, aliada à sua morfologia superficial, proporciona um conjunto de propriedades que favorecem a retenção de petróleo em ambientes aquáticos.

A análise por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) confirmou a presença dos principais constituintes da biomassa lignocelulósica, como a celulose, hemicelulose e lignina, além de grupos funcionais característicos que influenciam o processo de biossorção. Enquanto a celulose e a hemicelulose conferem suporte estrutural à parede celular, a elevada concentração de lignina aumenta o caráter hidrofóbico da fibra, favorecendo sua afinidade pelos hidrocarbonetos presentes no petróleo.

Sob o ponto de vista morfológico, as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram uma superfície irregular, com cavidades aparentes e estruturas longitudinais. Essas características podem favorecer o contato e a retenção física do petróleo na superfície da fibra. Entretanto, parâmetros como área superficial e porosidade não foram determinados quantitativamente neste estudo.

Além da composição química e da morfologia, a baixa densidade da fibra de coco constitui uma característica relevante para aplicações em ambientes marinhos. Por apresentar densidade inferior à da água, a fibra tende a permanecer flutuando, aumentando o contato com a película de petróleo presente na superfície e favorecendo sua recuperação durante operações de resposta a derramamentos. Essa propriedade, associada à elevada disponibilidade do material e ao seu caráter biodegradável, reforça o potencial da fibra de coco como uma alternativa sustentável aos sorventes sintéticos tradicionalmente empregados nessas operações.

Em conjunto, os resultados da caracterização demonstram que a fibra de coco *in natura* reúne propriedades estruturais e químicas que justificam seu elevado potencial como biossorvente de petróleo. A elevada concentração de lignina, a presença de grupos funcionais característicos da biomassa lignocelulósica e a morfologia rugosa e porosa favorecem a interação com os hidrocarbonetos e explicam sua eficiência na retenção de óleo. Essas características constituem a base para compreender os resultados experimentais de biossorção apresentados no capítulo seguinte, no qual serão avaliados o desempenho da fibra e os principais fatores que influenciam esse processo.

CAPÍTULO

05 Biossorção de petróleo utilizando fibras de coco *in natura*

5.1. INTRODUÇÃO

As características químicas e morfológicas da fibra de coco discutidas no capítulo anterior evidenciam seu potencial para atuar como biossorvente de petróleo. A elevada concentração de lignina, a presença de grupos funcionais característicos da biomassa lignocelulósica e a estrutura superficial rugosa e porosa favorecem a interação entre a fibra e os hidrocarbonetos, tornando esse resíduo agrícola uma alternativa promissora para aplicações em resposta a derramamentos de óleo.

Entretanto, a caracterização estrutural, por si só, não é suficiente para determinar a eficiência de um biossorvente. A aplicação prática desse material depende da avaliação de sua capacidade de retenção de petróleo em condições que representem, de forma controlada, o ambiente marinho. Fatores como as propriedades do óleo, as condições experimentais e as características do sistema de sorção podem influenciar diretamente o desempenho do material, sendo essenciais para compreender seu potencial de utilização em operações de remediação ambiental.

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos utilizados para a preparação da fibra de coco *in natura*, a caracterização do petróleo empregado nos ensaios e a metodologia adotada para determinar a capacidade de biossorção. Em seguida, são discutidos os resultados obtidos e sua comparação com estudos da literatura, estabelecendo as bases para as análises cinéticas e de equilíbrio desenvolvidas nos capítulos seguintes.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO PETRÓLEO UTILIZADO

O petróleo da Bacia de Campos, utilizado na presente pesquisa, foi selecionado devido à maior disponibilidade no Brasil, apresentando maiores chances de os petróleos derramados em acidentes possuírem características semelhantes a esse. O petróleo foi cedido pela PETROBRAS e caracterizado através da determinação do ponto de fluidez e densidade, segundo a norma ASTM D97 e ASTM D-4052, respectivamente. Com o valor da densidade, foi possível encontrar o ºAPI, uma vez que eles são parâmetros inversos (REYES, 2015). Esses parâmetros são investigados pois influenciam no espalhamento do óleo no ambiente marinho. As análises foram realizadas no Laboratório Núcleo de Estudos Ambientais (IGEO/UFBA).

Os resultados das análises para determinação da densidade, ºAPI e fluidez do petróleo da Bacia de Campos estão representadas na Tabela 1. A partir desses resultados, a amostra utilizada está inserida no grupo dos óleos pesados (10 <ºAPI< 25).

Esses conhecimentos são importantes, pois além das condições ambientais (vento e direção das correntezas), as propriedades físico-químicas também auxiliam na determinação do comportamento de remediação quando este contaminante é derramado no ambiente marinho (CETESB, 2015).

Tabela 1 – Densidades e fluidez para o óleo da Bacia de Campos.

Bacia	Densidade [g/mL]	Densidade API [ºAPI]	Fluidez [º Celsius]
Campos	0,9225	21,7	-39

Fonte: Própria.

Reyes (2015) utilizou o petróleo da Bacia de Campos, do mesmo poço da presente pesquisa, e encontrou os mesmos resultados para caracterização do óleo (densidade, ºAPI e fluidez), classificando o petróleo como pesado.

5.3. PREPARAÇÃO DAS FIBRAS PARA O ENSAIO DE BIOSSORÇÃO

As fibras de coco foram inicialmente submetidas a um processo de separação, removendo as fibras mais danificadas, e lavagem, a fim de retirar todas as impurezas presentes. A lavagem foi realizada com Extran na concentração de 0,5% v/v e água destilada. Posteriormente foi levada a estufa por 24 horas à 60°C para secagem completa, até atingir massa constante. As fibras, agora livres de impurezas, foram trituradas e passadas em peneiras até atingirem dimensões de 2 a 3 mm de comprimento, na faixa granulométrica entre 5 e 10 mesh, a fim de padronizar as áreas superficiais das fibras estudadas (ANNUNCIADO, SYDENSTRICKER, AMICO, 2005). As fibras foram acondicionadas em invólucros confeccionados com tecido não tecido (TNT), previamente selecionado por apresentar elevada flutuabilidade, caráter hidrofóbico, capacidade de permitir a passagem do petróleo até o material biossorvente e retenção eficiente das fibras, evitando perdas de massa durante os ensaios. As mini barreiras foram confeccionadas nas dimensões de 8 × 2 × 2 cm (Figura 1).

Figura 1 – Preparação da fibra de coco *in natura* para os ensaios de biossorção: fibras de coco após lavagem, secagem e seleção (esquerda); acondicionamento das fibras em mini barreira confeccionada com tecido não tecido (TNT) (direita), utilizada nos experimentos de sorção de petróleo.

5.4. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE BIOSSORÇÃO

Para realização dos ensaios de biossorção, foi utilizado um banho termostático marca Dubnoff modelo Q226M1, com aproximadamente 126 ciclos/minuto e temperatura de 25°C (temperatura média do ambiente marinho). Inicialmente, foi preparada água salina com a utilização de sal marinho e água ultra-pura sob agitação até atingir a salinidade 3,5% (35 partes por mil), que corresponde a salinidade média encontrada nos ambientes marinhos.

O experimento foi conduzido em béqueres com 95mL de água salina e 5mL de petróleo da Bacia de Campos (Figura 2). A mistura foi introduzida no banho e posteriormente, acrescentou-se as mini-barreiras com o material adsorvente sobre a mancha de petróleo (ANNUNCIADO, SYDENSTRICKER, AMICO, 2005).

Figura 2 – Sistema experimental utilizado nos ensaios de biossorção de petróleo, composto por 95 mL de água salina e 5 mL de petróleo da Bacia de Campos, antes da introdução da mini barreira contendo a fibra de coco *in natura*.

Em seguida as amostras foram pesadas e congeladas. Em seguida, foram secas a frio no liofilizador, para retirar toda umidade presente após a sorção. Esse procedimento foi realizado, uma vez que as fibras de coco possuem a capacidade de sorver água, podendo prejudicar a análise gravimétrica de quantificação da massa adsorvida do petróleo pelas fibras. Logo após a desidratação, as amostras foram pesadas.

A capacidade de sorção das fibras foi determinada através da Equação 1, onde S é a capacidade de adsorção (g de sorbato/g de sorvente), S_0 (g) é a massa inicial da fibra e S_f (g) é a massa final da fibra após adsorção (ANNUNCIADO, SYDENSTRICKER, AMICO, 2005). Os testes foram realizados pelas fibras *in natura*. Os resultados do teste cinético foram comprovados por meio da aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

$$q = \frac{mf - m0}{m0} \qquad (1)$$

Em que q é a capacidade de biossorção ($g.g^{-1}$), m0 é a massa inicial do biossorvente (g) e mf é a massa final do biossorvente após a sorção (g).

5.5. DESEMPENHO DAS FIBRAS DE COCO

A capacidade de biossorção constitui um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a eficiência de materiais empregados na remoção de petróleo em ambientes aquáticos. Nos ensaios realizados com a fibra de coco *in natura*, observou-se elevada capacidade de retenção do petróleo da Bacia de Campos, alcançando 6,53 ± 0,88 g de petróleo por grama de fibra antes da liofilização e 3,62 ± 0,40 $g.g^{-1}$ após a remoção da água por liofilização, ambos no tempo de contato de cinco minutos. A redução observada após a liofilização evidencia que parte da massa inicialmente retida correspondia à água absorvida pela fibra, devido à presença de grupos hidrofílicos característicos da biomassa lignocelulósica.

Apesar dessa redução, a capacidade de biossorção obtida após a liofilização confirma o potencial da fibra de coco *in natura* como biossorvente de petróleo, uma vez que o valor representa exclusivamente a massa de óleo efetivamente retida pelo material. Esse procedimento permitiu eliminar a interferência da água na análise gravimétrica, proporcionando uma avaliação mais representativa da eficiência da fibra na remoção do contaminante.

Esses resultados obtidos são consistentes com aqueles reportados na literatura para fibras de coco utilizadas como biossorventes de derivados de petróleo e combustíveis. Entretanto, observa-se ampla variação entre os valores publicados, reflexo das diferenças nas características do óleo, nas condições experimentais e na metodologia empregada em cada estudo. Trabalhos anteriores reportaram capacidades de sorção variando de 0,58 g g^{-1}, para óleo de motor (KHAN et al., 2004), até 5,40 g g^{-1}, para petróleo bruto da Bacia de Campos (ANNUNCIADO; SYDENSTRICKER; AMICO, 2005). Estudos utilizando gasolina e petróleo leve também apresentaram capacidades de 1,30 g g^{-1} (SANTOS et al., 2007) e 2,08 g g^{-1} (SANTOS et al., 2017), respectivamente, enquanto Cardoso et al. (2017), utilizando fibra de coco liofilizada, obtiveram capacidade de 1,95 g g^{-1}.

Tabela 2 – Capacidade de biossorção da fibra de coco reportada na literatura.

BIOFIBRA	ÓLEO	SORÇÃO	REF.
Fibra de coco sem liofilizar	Óleo de motor	0,58 g/g	(Khan *et al.*, 2004)
Fibra de coco sem liofilizar	Petróleo cru (Bacia de Campos)	5,4 g/g	(Annunciado *et al.*, 2005)
Fibra de coco sem liofilizar	Gasolina	1,3 g/g	(Santos *et al.*, 2007)
Fibra de coco sem liofilizar	Petróleo leve	2,08 g/g	(Santos *et al.*, 2017)
Fibra de coco liofilizada	Petróleo leve	1,95 g/g	(Cardoso *et al.*, 2017)
Fibra de coco sem liofilizar	Benzeno	0,225 g/g	(Luis-Zarate *et al.* 2018)

Os resultados apresentados neste estudo demonstram que a fibra de coco *in natura* apresenta desempenho semelhante ou superior ao observado em diversos trabalhos da literatura, reforçando seu potencial para aplicação em operações de resposta a derramamentos de petróleo. Deve-se ressaltar, entretanto, que comparações diretas entre valores de sorção devem ser realizadas com cautela, uma vez que fatores como o tipo de petróleo, sua viscosidade, o grau de intemperismo, a granulometria da fibra, a salinidade da água e as condições hidrodinâmicas influenciam significativamente a capacidade de retenção de óleo.

5.6. APLICABILIDADE DAS FIBRAS

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram que a fibra de coco *in natura* possui potencial para aplicação na remoção de petróleo em ambientes aquáticos. Sua capacidade de biossorção, aliada às propriedades químicas e estruturais discutidas no capítulo anterior, evidencia que esse resíduo lignocelulósico reúne características favoráveis para atuar como biossorvente em operações de resposta a derramamentos de óleo.

Além do desempenho observado nos ensaios experimentais, a fibra de coco apresenta vantagens ambientais e econômicas que reforçam sua aplicabilidade. Trata-se de um material renovável, biodegradável, de baixo custo e amplamente disponível em países produtores de coco, como o Brasil. Sua utilização contribui para a valorização de resíduos agroindustriais e para o desenvolvimento de tecnologias de remediação mais sustentáveis, reduzindo a dependência de sorventes sintéticos derivados de fontes não renováveis.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de utilização da fibra em mini barreiras confeccionadas com tecido não tecido (TNT), configuração que facilita o manuseio, a recuperação do material após o uso e sua destinação ambientalmente adequada. Além de minimizar perdas de fibras durante a operação, esse sistema permite o contato do petróleo com o biossorvente, favorecendo sua aplicação em diferentes cenários de derramamento.

Em conjunto, os resultados obtidos confirmam que a fibra de coco *in natura* constitui um biossorvente promissor para aplicações na remoção de petróleo, associando capacidade de retenção, ampla disponibilidade e sustentabilidade. Entretanto, além da quantidade de óleo retida, é fundamental compreender como o processo de biossorção ocorre ao longo do tempo. Dessa forma, o capítulo seguinte apresenta o estudo cinético da biossorção, permitindo avaliar a evolução temporal da sorção de petróleo pela fibra de coco e os mecanismos envolvidos nesse processo.

CAPÍTULO

06 Cinética de biossorção de petróleo por fibras de coco *in natura*

6.1. INTRODUÇÃO

A eficiência de um biossorvente não depende apenas da quantidade de contaminante que ele é capaz de reter, mas também da velocidade com que esse processo ocorre. Em situações de derramamento de petróleo, compreender a evolução temporal da biossorção é essencial para avaliar o desempenho do material e estimar o tempo necessário para que a interação entre o óleo e o biossorvente atinja o equilíbrio.

Os estudos cinéticos permitem acompanhar a variação da capacidade de biossorção ao longo do tempo, fornecendo informações importantes sobre a velocidade do processo, o tempo de equilíbrio e os possíveis mecanismos envolvidos na retenção do petróleo. Além disso, a aplicação de modelos cinéticos possibilita descrever matematicamente o comportamento experimental e identificar o modelo que melhor representa a interação entre o adsorvato e o biossorvente, contribuindo para a compreensão do processo de sorção.

No caso da fibra de coco *in natura*, a avaliação cinética apresenta um aspecto adicional de grande relevância. Por se tratar de um material lignocelulósico, a fibra possui capacidade de interagir tanto com o petróleo quanto com a água presente no meio. Dessa forma, a quantificação da massa efetivamente adsorvida requer procedimentos capazes de minimizar a interferência da umidade, permitindo uma estimativa mais representativa da capacidade de biossorção do petróleo.

Neste capítulo são apresentados os resultados da cinética de biossorção da fibra de coco *in natura*, incluindo a comparação entre as amostras antes e após a liofilização e a aplicação dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para descrever o comportamento experimental.

6.2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA CINÉTICA

Os ensaios cinéticos foram realizados utilizando o mesmo sistema experimental descrito no Capítulo 5 para determinação da capacidade de biossorção, mantendo-se as mesmas condições de temperatura (25 °C), salinidade da água (3,5%), volume de água salina (95 mL), volume de petróleo da Bacia de Campos (5 mL), sistema de agitação e quantidade de biossorvente. A única variável modificada foi o tempo de contato entre a fibra de coco *in natura* e o petróleo.

Para acompanhar a evolução temporal da biossorção, o experimento foi conduzido durante 120 minutos, sendo retiradas amostras em triplicata nos tempos de 5, 20, 40, 60, 90 e 120 minutos. Após cada intervalo, as mini barreiras contendo a fibra de coco foram removidas para determinação da capacidade de biossorção. As análises foram realizadas antes e após a liofilização das amostras, permitindo avaliar a influência da água absorvida pela fibra na quantificação gravimétrica do petróleo sorvido (ANNUNCIADO; SYDENSTRICKER; AMICO, 2005).

Com os resultados do teste cinético, foi realizada a modelagem para determinar qual modelo mais se ajusta aos dados experimentais. A tabela 1 mostra os modelos que foram usados para ajustar os dados experimentais obtidos nos ensaios: pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Tabela 1– Modelos cinéticos utilizados para modelagem.

MODELO CINÉTICO	EQUAÇÃO
Pseudo-primeira ordem	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303}t$
Pseudo-segunda ordem	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$

6.3. COMPORTAMENTO CINÉTICO DA FIBRA DE COCO

As curvas de cinética resultantes desse teste são expressas antes e após a desidratação da fibra no liofilizador. Essa análise comparativa é de fundamental importância, uma vez que a fibra tem a capacidade de sorver água, interferindo na análise gravimétrica de sorção de petróleo.

No teste para fibra de coco *in natura* sem desidratar (Figura 1), houve uma sorção acentuada até os 5 minutos e em seguida essa sorção permanece praticamente constante. Analisandos os dados pelo teste de Tukey a 95% de confiança (Tabela 2), a partir dos 20 min a sorção das fibras não diferem entre si até o tempo de 90 min. Em 120 min houve um aumento na sorção, que pode ser explicada pela hidrodinâmica marinha simulada, que faz com que as fibras possuam a capacidade de adsorver e dessorver o petróleo com o passar do tempo.

Após a desidratação da fibra (Figura 2), foi possível observar a interferência da maior porcentagem de estruturas hidrofílicas presentes na fibra de coco, que fez com que uma grande quantidade do material sorvido fosse água, alterando a sorção de 6,80 g/g sem desidratar para 3,62 g/g após desidratação, no tempo de 5 minutos. Além disso, o comportamento cinético de sorção com o passar dos tempos permaneceu praticamente inalterado com o passar do tempo, ocorrendo uma variação da sorção apenas nos tempos de 40 min (aumento da sorção) e 90 min (dessorção), segundo o teste de Tukey (Tabela 2).

Figura 1 – Cinética de sorção da fibra *in natura* antes da liofilização.

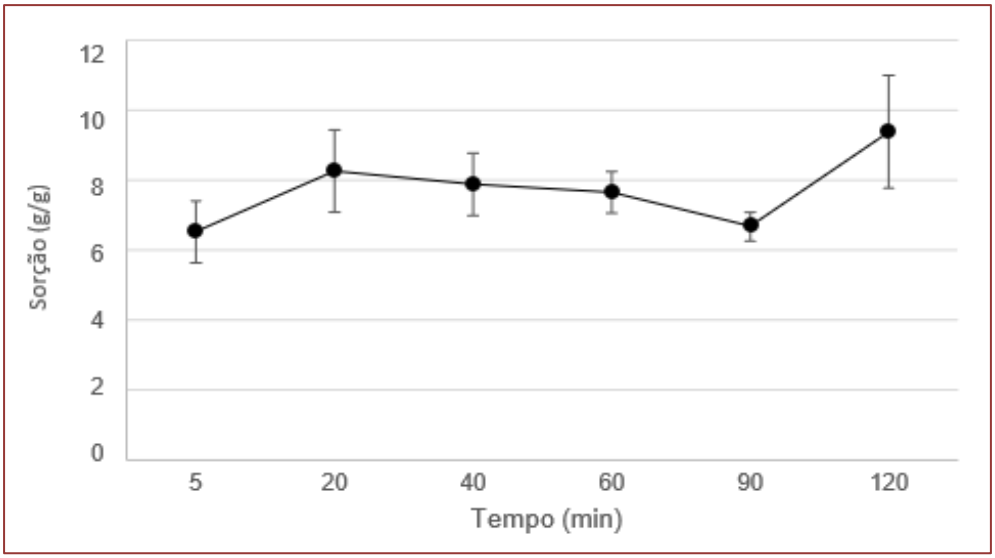


Figura 2 – Cinética de sorção da fibra *in natura* após a liofilização.

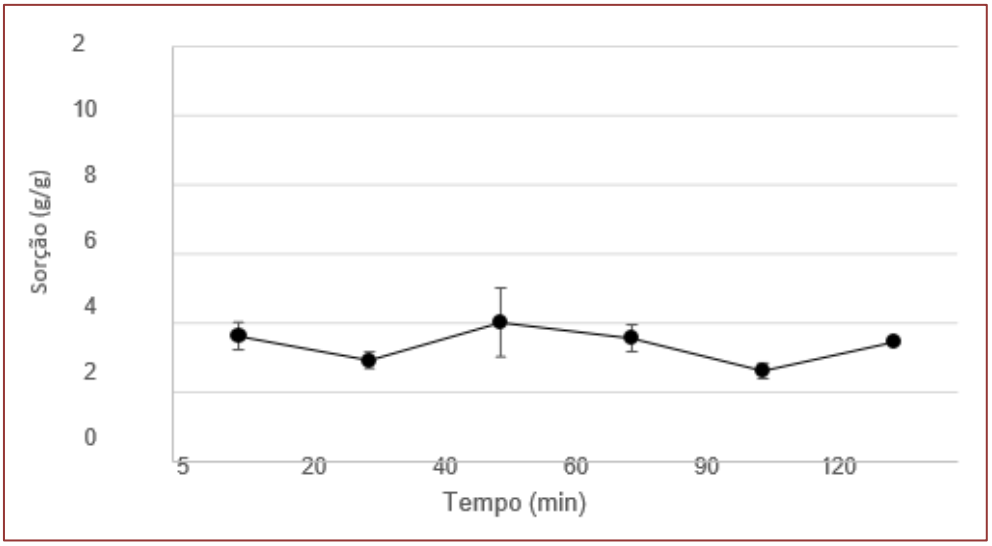


Tabela 2 – Média de sorção antes e após a liofilização das fibras *in natura* e aplicação do teste de Tukey.

TEMPO	Sorção (após liofilização)	Sorção (antes da liofilização)
5	3,62±0,40^{b,a}	6,53±0,88^{b}
20	2,91±0,24^{b,a}	8,27±1,17^{b,a}
40	4,02±1,01^{a}	7,89±0,89^{b,a}
60	3,55±0,39^{b,a}	7,66±0,59^{b,a}
90	2,60±0,23^{b}	6,68±0,41^{b,a}
120	3,44±0,07^{b,a}	9,39±1,60^{a}

Médias seguidas de letras iguais, na mesma coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 95% de confiança.

Antes da liofilização, a capacidade de sorção atingiu 6,53 ± 0,88 $g.g^{-1}$ aos 5 minutos, valor superior ao observado após a desidratação (3,62 ± 0,40 $g.g^{-1}$). Essa diferença evidencia que parte da massa inicialmente quantificada corresponde à água absorvida pela estrutura lignocelulósica da fibra. Após a remoção da umidade por liofilização, a análise gravimétrica passou a representar predominantemente o petróleo efetivamente biossorvido.

Embora a liofilização tenha sido empregada para remover a umidade presente nas amostras, reduzindo a interferência da água na determinação gravimétrica da capacidade de biossorção, é importante considerar que outros fatores podem exercer influência sobre a massa final obtida. Entre eles, destacam-se a possível retenção de sais provenientes da água salina utilizada nos ensaios e a contribuição do invólucro de TNT empregado para acondicionar as fibras. Entretanto, como todas as amostras foram submetidas ao mesmo protocolo experimental, utilizando as mesmas condições de preparação, exposição, secagem e pesagem, tais contribuições são esperadas de forma sistemática e uniforme entre os ensaios, não comprometendo a comparação relativa do desempenho das amostras.

De maneira geral, os resultados demonstram que a maior parte da biossorção ocorre logo no início do contato entre a fibra e o petróleo, enquanto os tempos subsequentes apresentam pequenas variações na quantidade retida. Esse comportamento indica que a fibra de coco *in natura* possui elevada afinidade inicial pelos hidrocarbonetos, atingindo rapidamente uma condição próxima ao equilíbrio do sistema.

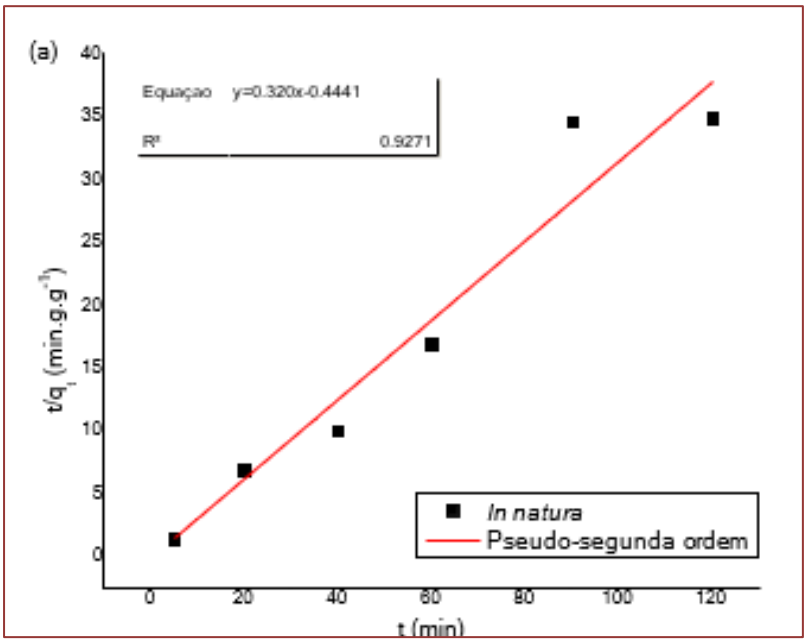
A redução da capacidade de sorção após a liofilização confirma que a fibra de coco interage simultaneamente com petróleo e água. Esse comportamento está associado à natureza lignocelulósica do material, cuja estrutura contém grupos hidroxila provenientes principalmente da celulose e da hemicelulose, capazes de estabelecer interações com a água, ao mesmo tempo em que a elevada proporção de lignina favorece a interação com os hidrocarbonetos do petróleo.

Com o objetivo de descrever matematicamente o comportamento da biossorção de petróleo pela fibra de coco *in natura*, os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, amplamente empregados para representar processos de adsorção em materiais lignocelulósicos.

Para o modelo de pseudo-primeira ordem, foi obtido coeficiente de determinação (R^2) de 0,8181 e constante cinética (k_1) de 0,0348 min^{-1}. Já o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou R^2 = 0,9270 e constante cinética (k_2) de 0,2306 $g{\cdot}g^{-1}{\cdot}min^{-1}$, estimando uma capacidade de biossorção no equilíbrio (q_e) de 3,62 $g{\cdot}g^{-1}$. O maior coeficiente de determinação obtido para o modelo de pseudo-segunda ordem indica que este representou de forma mais satisfatória o comportamento experimental da fibra de coco *in natura*.

A Figura 3 apresenta a correlação entre os dados experimentais e aqueles estimados pelo modelo de pseudo-segunda ordem, evidenciando a boa concordância entre os resultados observados e os valores previstos.

Figura 3 – Gráficos plotados da correlação dos dados experimentais da fibra *in natura.*



O melhor ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem sugere que esse modelo descreve adequadamente a evolução temporal da biossorção de petróleo pela fibra de coco *in natura*, corroborando estudos da literatura que relatam comportamento semelhante para biossorventes lignocelulósicos. Embora esse modelo seja frequentemente associado a mecanismos de quimissorção, seu bom ajuste não implica, isoladamente, que a biossorção ocorra exclusivamente por interações químicas, uma vez que processos físicos e químicos podem atuar simultaneamente na retenção do petróleo pela fibra.

Logo, os resultados obtidos demonstraram que a fibra de coco *in natura* apresenta elevada capacidade de biossorção de petróleo logo nos primeiros minutos de contato, mantendo comportamento próximo ao equilíbrio durante o restante do período experimental. A comparação entre as amostras antes e após a liofilização evidenciou a influência da água absorvida pela estrutura lignocelulósica da fibra na quantificação gravimétrica, destacando a importância desse procedimento para determinar a massa de petróleo efetivamente retida.

A modelagem cinética indicou que o modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor representou os dados experimentais, demonstrando boa concordância com o comportamento observado. Embora a cinética permita compreender a evolução temporal da biossorção, a determinação da capacidade máxima de retenção do biossorvente requer a avaliação do equilíbrio de sorção, tema abordado no capítulo seguinte.

CAPÍTULO

07 Equilíbrio de biossorção de petróleo pelas fibras de *coco in natura*

7.1.INTRODUÇÃO

Após compreender a velocidade com que ocorre a biossorção de petróleo pela fibra de coco *in natura*, torna-se necessário avaliar a capacidade máxima de retenção desse material quando o sistema atinge o equilíbrio. Enquanto a cinética descreve a evolução temporal do processo, o estudo do equilíbrio permite compreender a distribuição do petróleo entre a fase líquida e a superfície do biossorvente, fornecendo informações fundamentais sobre sua capacidade de adsorção e a intensidade das interações envolvidas.

O comportamento de equilíbrio é normalmente descrito por meio de isotermas de adsorção, modelos matemáticos que relacionam a quantidade de contaminante retida pelo biossorvente com a concentração remanescente na solução após o estabelecimento do equilíbrio. Esses modelos possibilitam estimar parâmetros importantes, como a capacidade máxima de adsorção, a afinidade entre adsorvente e adsorvato e as características da superfície do material, sendo amplamente utilizados na avaliação de biossorventes lignocelulósicos.

Neste capítulo, são apresentados os ensaios de equilíbrio de biossorção de petróleo utilizando a fibra de coco *in natura*, bem como a modelagem dos dados experimentais por meio das isotermas de Langmuir, Freundlich e Sips. A comparação entre esses modelos permite identificar aquele que melhor representa o comportamento do sistema e compreender os mecanismos envolvidos na retenção de petróleo pela fibra de coco.

7.2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EQUILÍBRIO DA BIOSSORÇÃO

O estudo do equilíbrio de biossorção foi realizado com o objetivo de determinar a capacidade de retenção de petróleo pela fibra de coco *in natura* em diferentes concentrações do contaminante. Os ensaios foram conduzidos utilizando o mesmo sistema experimental descrito no Capítulo 5, mantendo-se constantes a massa do biossorvente, a temperatura, a salinidade da água e o tempo de contato entre a fibra de coco e o petróleo (NWADIOGBU et al., 2016). A única variável experimental foi a concentração inicial de petróleo, que foi modificada para a obtenção da isoterma de equilíbrio.

Após os ensaios, foi determinada a capacidade de biossorção no equilíbrio (q_e), sendo os resultados utilizados para a construção das isotermas de equilíbrio e posterior ajuste aos modelos de Langmuir, Freundlich e Sips. Os dados experimentais também foram submetidos à análise estatística por meio do teste de Tukey, considerando nível de significância de 5%.

Após a construção das isotermas de sorção, foram aplicados os modelos de equilíbrio de sorção para ajustar aos dados experimentais: Langmuir, Freundlich e Sips (Tabela 1). Esses modelos foram escolhidos pois são os que mais se utilizam na literatura.

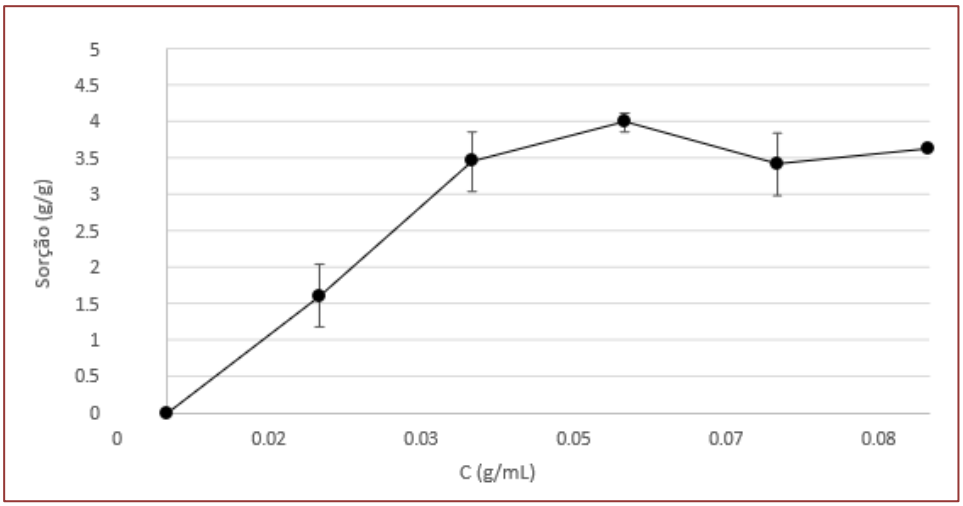
Tabela 1 – Modelos das isotermas de equilíbrio de sorção utilizados para modelagem.

MODELO DE ISOTERMAS	EQUAÇÃO
Langmuir	$q = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$
Freundlich	$q = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$
SIPS	$q = \frac{q_{ms} (bC)^{1/n}}{1 + (bC)^{1/n}}$

7.3. COMPORTAMENTO DO EQUILÍBRIO DA BIOSSORÇÃO

A Figura 1 apresenta a isoterma de equilíbrio obtida para a biossorção de petróleo pela fibra de coco *in natura*. Observa-se que a capacidade de biossorção aumenta à medida que a concentração de petróleo é elevada, até atingir uma região de estabilização, indicando que o sistema se aproxima da condição de equilíbrio.

Figura 1 – Curva de equilíbrio de sorção das fibras *in natura*.



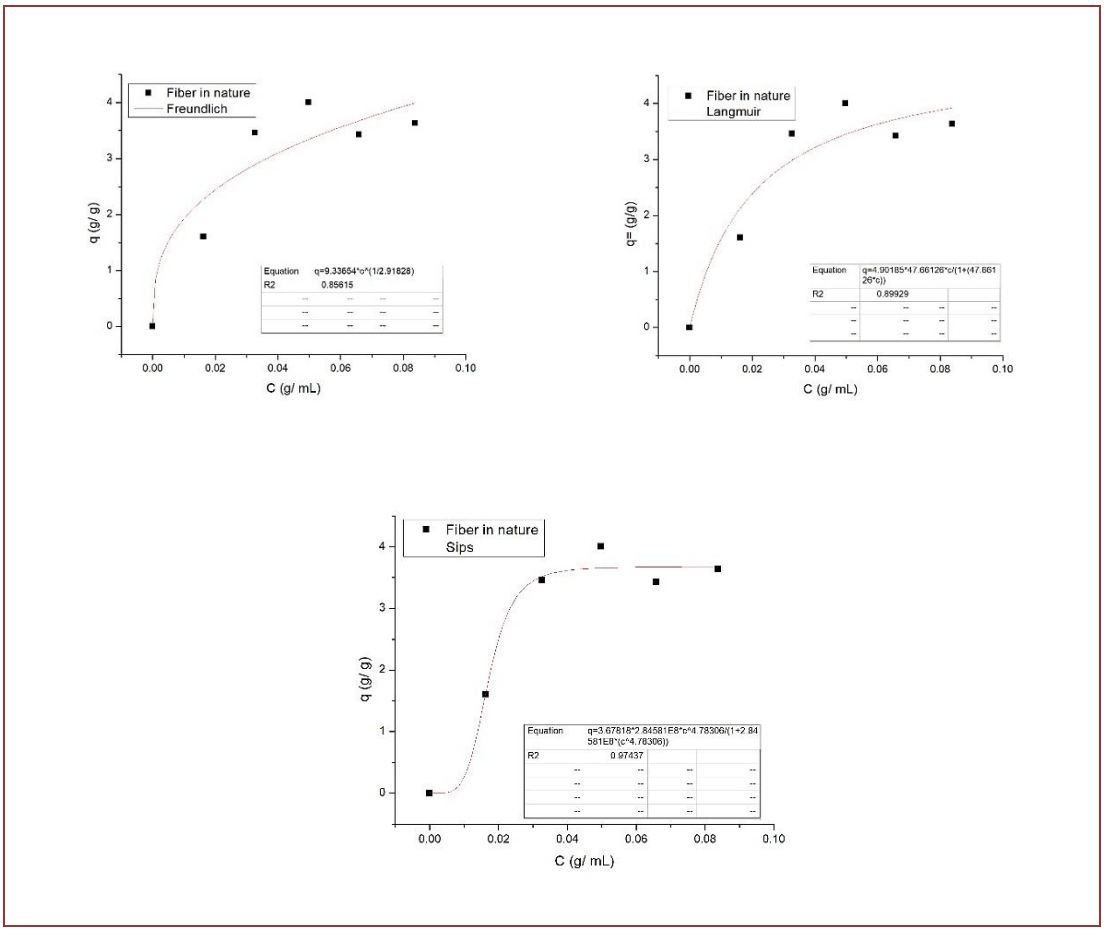
Esse comportamento é característico de processos de adsorção, nos quais a disponibilidade inicial de sítios ativos favorece a retenção do contaminante. À medida que esses sítios vão sendo ocupados, o incremento da capacidade de sorção diminui progressivamente até que a quantidade de petróleo adsorvida permaneça praticamente constante, caracterizando a saturação parcial do biossorvente.

Para a fibra de coco *in natura*, verificou-se que essa tendência de estabilização ocorreu a partir de aproximadamente 4,0 mL de petróleo adicionados a 96,0 mL de água salina, evidenciando que, a partir dessa concentração, aumentos na quantidade de petróleo disponível resultam em incrementos pouco expressivos na capacidade de biossorção. Esse comportamento indica que uma parcela significativa dos sítios ativos disponíveis na superfície da fibra já se encontrava ocupada.

A forma da isoterma obtida demonstra que a fibra de coco apresenta elevada afinidade pelo petróleo nas menores concentrações avaliadas, seguida por uma redução gradual da taxa de retenção à medida que o biossorvente se aproxima de sua capacidade de saturação. Esse resultado reforça o potencial da fibra de coco *in natura* como biossorvente para aplicação em derramamentos de petróleo, especialmente nas etapas iniciais da contaminação, quando a disponibilidade de sítios ativos favorece a remoção do contaminante.

Os dados experimentais obtidos para o equilíbrio da biossorção de petróleo pela fibra de coco *in natura* foram ajustados aos modelos de Langmuir, Freundlich e Sips, utilizando regressão não linear. A Figura 2 apresenta a comparação entre os valores experimentais e as curvas ajustadas para cada modelo.

Figura 2 - Ajuste dos modelos de Langmuir, Freundlich e Sips aos dados experimentais.



Entre os modelos avaliados, a isoterma de Sips apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, com coeficiente de determinação (R^2 = 0,9706). Os modelos de Langmuir e Freundlich também descreveram o comportamento da biossorção, porém apresentaram coeficientes de determinação inferiores, indicando menor capacidade de representar o sistema estudado.

O melhor desempenho do modelo de Sips indica que a biossorção de petróleo pela fibra de coco *in natura* não pode ser descrita adequadamente apenas pelos pressupostos dos modelos de Langmuir ou Freundlich de forma isolada. Esse modelo reúne características de ambos, permitindo representar sistemas cuja superfície apresenta heterogeneidade energética e diferentes tipos de sítios de adsorção.

Em baixas concentrações de petróleo, o modelo de Sips apresenta comportamento semelhante ao modelo de Freundlich, refletindo a heterogeneidade da superfície do biossorvente e a maior disponibilidade de sítios ativos. À medida que a concentração aumenta, o modelo tende ao comportamento descrito por Langmuir, indicando a ocupação progressiva desses sítios até a aproximação da capacidade máxima de adsorção.

Esse comportamento está de acordo com as características estruturais da fibra de coco discutidas nos capítulos anteriores. A composição lignocelulósica, a presença de grupos funcionais identificados por espectroscopia no infravermelho e a superfície irregular observada por microscopia eletrônica de varredura conferem ao material diferentes regiões de interação com os hidrocarbonetos do petróleo, justificando o melhor ajuste obtido pelo modelo de Sips.

Logo, esses resultados obtidos complementam os estudos de caracterização físico-química, biossorção e cinética apresentados nos capítulos anteriores, reforçando o potencial da fibra de coco *in natura* como um biossorvente sustentável e promissor para aplicação na resposta a derramamentos de petróleo em ambientes aquáticos.

CAPÍTULO

08 Perspectivas para o uso da fibra de coco na resposta a derramamentos de petróleo

Os resultados apresentados ao longo desta obra demonstram o potencial da fibra de coco *in natura* como biossorvente para a remediação de derramamentos de petróleo. Entretanto, diversos aspectos ainda podem ser explorados para ampliar o conhecimento sobre o material e contribuir para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para resposta a acidentes envolvendo hidrocarbonetos.

Entre as principais perspectivas de pesquisa, destaca-se a realização de estudos geoquímicos do petróleo adsorvido pelas fibras, permitindo avaliar possíveis alterações em sua composição e investigar a viabilidade de recuperação e reutilização do óleo pela indústria petroquímica. Da mesma forma, a avaliação da reutilização das fibras após sucessivos ciclos de biossorção representa uma importante estratégia para aumentar a sustentabilidade e reduzir os custos operacionais associados à aplicação desse biossorvente.

Outra linha promissora consiste na investigação do comportamento da fibra de coco frente a diferentes tipos de petróleo, incluindo óleos provenientes do pré-sal brasileiro e de outras bacias petrolíferas nacionais e internacionais. Como a composição química e as propriedades físico-químicas dos óleos influenciam diretamente a biossorção, estudos dessa natureza podem ampliar a aplicabilidade da tecnologia em diferentes cenários de derramamento.

Além disso, novas estratégias de modificação da biomassa podem ser exploradas com o objetivo de aumentar a capacidade de biossorção e a seletividade da fibra de coco. A avaliação de diferentes pré-tratamentos químicos, físicos e biológicos, bem como a combinação dessas técnicas, representa uma alternativa promissora para otimizar as propriedades superficiais do biossorvente. Essas modificações devem ser acompanhadas por técnicas avançadas de caracterização estrutural e superficial, permitindo compreender de forma mais detalhada os mecanismos responsáveis pela interação entre a fibra e os hidrocarbonetos.

Por fim, recomenda-se ampliar as condições experimentais avaliadas, incluindo estudos sobre a influência de variáveis ambientais, como temperatura, salinidade, pH e hidrodinâmica, além da realização de ensaios em escala piloto e em condições reais de derramamentos de petróleo. Essas investigações contribuirão para aproximar os resultados laboratoriais das condições operacionais encontradas em ambientes marinhos, favorecendo a aplicação prática da fibra de coco como uma solução baseada na natureza para a resposta a derramamentos de petróleo.

REFERÊNCIAS

[1] ANNUNCIADO, T. R.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; AMICO, S. C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. Marine Pollution Bulletin, v. 50, p. 1340–1346, 2005.

[2] ALBERSHEIM, P.; DARVILL, A.; ROBERTS, K.; SEDERROFF, R.; STAEHELIN, A. The structural polysaccharides of the cell wall and how they are studied. In: . (ed.) Plant Cell Walls. Nova York: Garland Science, 2011, p. 43-66.

[3] ALLAN, S. E.; SMITH, B. W.; ANDERSON, K. A. Impact of the deepwater horizon oil spill on bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons in Gulf of Mexico coastal Waters. Environmental Science and Technology, v. 46, p. 2033–2039, 2012.

[4] ANP. Agência Nacional do Petróleo. Portaria n. 80, de 30 de abril de 1999. Disponível em: https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/Servicos/licenciamento/postos/legislacao/Portaria_ANP_80_99.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

[5] BARBOSA, A. P. Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti. 2011. 141f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2011.

[6] BARRAGAN, O. L. V. Caracterização Geoquímica de óleos da América. 2012. 107f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica do Petróleo e Ambiental) – Instituto de Geociência, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

[7] BHARDWAJ, N.; BHASKAEWAR, A. N. A review on sorbent devices for oil-spill control. Environmental Pollution, v. 243B, p. 1758-1771, 2018.

[8] BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 472, de 27 de novembro de 2015. Dispõe sobre o uso de dispersantes químicos em incidentes de poluição por óleo no mar.

[9] CALDAS, A. S.; VIANA, Z. C. V.; SANTOS, V. L. C. S. Fibras de Cocos nucifera como sorvente de petróleo em ambiente marinho. Acta Brasiliensis, v. 1, n. 1, p.13-18,2017.

[10] CANILHA, L.; MILAGRES, A. M. F.; SILVA, S. S.; SILVA, J. B. A.; FELIPE, M. G. A.; ROCHA, G. J. M.; FERRAZ, A.; CARVALHO, W. Sacarificação da biomassa lignocelulósica através de pré-hidrólise ácida seguida por hidrólise enzimática: uma estratégica de “desconstrução” da fibra vegetal. Revista Analytica, v. 8, n. 44, p. 48-54, 2010.

[11] CANTAGALLO, C.; MILANELLI, J. C.; DIAS-BRITO, D. Limpeza de ambientes costeiros brasileiros contaminados por petróleo: uma revisão. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2007.

[12] CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, I. T. A.; BISPO, A. F.; SANTOS, J. F.; LOBATO, A. K. C. L.; CARDOSO, R. P. G. C; ARAGÃO, T. Natural sorvents in the cleaning of petroleum in marine waters: simulation with the petroleum of the Sergipe Basin. XXI Simpósio Nacional de Bioprocessos, v. 2, 58996, 2017.

[13] CARDOSO, C. K. M.; CARDOSO, R. P. G. C.; CAVALCANTE, B. M. N.; MOREIRA, I. T. A.; LOBATO, A. K. C. L. Adsorção de petróleo derramado em ambiente marinho através de fibras naturais residuais tratadas, III Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, CONEPETRO, 2018.

[14] CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. de S.; OLIVEIRA, O. M. C. de; LOBATO, A. K. de C. L. Bio-Based Sorbents for Marine Oil Spill Response: Advances in Modification, Circularity, and Waste Valorization. Resources, v. 14, 140, 2025a.

[15] CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. de S.; OLIVEIRA, O. M. C. de; LOBATO, A. K. de C. L. Multiscale Evaluation of Raw Coconut Fiber as Biosorbent for Marine Oil Spill Remediation: From Laboratory to Field Applications. Resources, v. 14, art. 159, 2025b.

[16] CERQUEIRA, P. R. O. Proteção e limpeza de ambientes costeiros da ilha de Boipeba contaminados por petróleo: o uso alternativo da fibra de coco como barreira e sorventes naturais. 2010. 180f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Salvador, Salvador, 2010.

[17] CETESB. Fatores que influem no grau de impacto, 2015. Disponível em: http://emergenciasquimicas.cetesb.sp.gov.br/tipos-de-acidentes/vazamentos-deleo/impactos-ambientais/fatores-que-influem-no-grau-de-impacto/. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

[18] CHAKRABORTY, M.; KARUM, A.; MITRA, A. Accumulation of phenylpropanoid derivatives in chitosan-induced cell suspension culture of Cocos nucifera. Journal Plant Physiol, v. 166, n. 1, p. 63-71, 2009.

[19] CORDEIRO, M. A. Estudo da hidrólise enzimática do caroço de açaí (Euterpe oleraceae Mart) para a produção de etanol. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

[20] CRAIG, A. P. L; SENA, E.; MAGALHÃES, L.; KRAUSE, M. C.; NEVES, P. R.; SILVA, M. J. Técnicas de limpeza de vazamentos de petróleo em alto mar. Cadernos de Graduação- Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 1, n.15, p. 75-86, 2012

[21] CRESTINI, C., CRUCIANELLI, M., ORLANDI, M., SALADINO, R. Oxidative strategies in lignin chemistry: A new environmental friendly approach for the functionalisation of lignin and cellulosic fibers. Catalysis today, v. 156, p. 8-22, 2010.

[22] EL-DIN, G. A.; AMER, A. A.; MALSH, G.; HUSSEIN, M. Study on the use of banana peels for oil spill removal. A review of Alexandria Engineering Journal, v. 57, p. 2061–2068, 2018.

[23] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Relatório Parcial 2, Cenários de Demanda para o PNE 2050, 2018.

[24] FOGLER, H. S. Elementos de Engenharia das Reações Químicas. 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

[25] GONG, Y.; ZHAO, X.; CAI, Z.; O'REILLY, S. E.; HAO, X.; ZHAO, D. A review of oil, dispersed oil and sediment interactions in the aquatic environment: Influence on the fate, transport and remediation of oil spills. Marine Pollution Bulletin, v. 79, p. 16-33, 2014.

[26] GRABBER, J. H. How do lignin composition, structure, and cross-linking affect degradability? A review of cell wall model studies. Crop Science, v. 45, p. 820 – 831, 2005.

[27] GUZMÁN-OSORIO, F. J.; ADAMS, R. H.; DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, V. I.; LOBATO-GARCÍA, D. C.; GUERRERO-PENA, A.; BARAJAS-HERNÁNDEZ, J. R.; BALTIERRA-TREJO, E. Alternative method for determining API degrees of petroleum in contaminated soil by FTIR. Egyptian Journal of Petroleum, v. 23, p. 39-44, 2019.

[28] HYLAND, J. L.; SCHINEIDER, E. D. Petroleum hydrocarbons and their effect on marine organisms, populations, comunities, and ecosystems. In: Sources, effects and skins of hydrocarbons in the marine environment. Proceedings of the symposium, DC: Washington, 1976.

[29] IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. 2019. Manchas de Óleo Litoral do Nordeste. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo. Acesso em: 15 de novembro de 2019.

[30] IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Produção Agrícola Municipal. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457. Acesso em: 11 de agosto de 2026.

[31] IFELEBUEGU, O. A.; NGUYEN, T. V. A.; UKOTIJE-IKWUT, P.; MOMOH, Z. Liquid phase sorption characteristics of human hair as a natural oil spill sorbent. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 3, 2015, p. 938–943, 2015.

[32] IFELEBUEGU, A. O.; MOMOH, Z. An Evaluation of the Adsorptive Properties of Coconut Husk for Oil Spill Cleanup. *Adsorption*, v. 6, n. 7, p. 8, 2015.

[33] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Oil 2025: analysis and forecast to 2030. Paris: IEA, 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/oil-2025. Acesso em: 28 jul. 2026.

[34] IPIECA, International Petroleum Industry Environmental Conservation Association. 1995. Biological Impacts of Oil Pollution: Rocky Shores. V.7. Disponível em http://www.ipieca.org. Acesso em: 12 de novembro de 2019.

[35] ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation. Oil Tanker Spill Statistics 2018. Disponível em: https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/. Acesso em: 20 de março de 2019.

[36] ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation. Country and territory profiles: United States of America, 2012. Disponível em: http://www.itopf.org/fileadmin/data/Documents/Country_Profiles/usa.pdf. Acesso em: 20 maio 2026.

[37] ITOPF. Oil Tanker Spill Statistics 2025. Disponível em: https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2025/. Acesso em: 28 jul. 2026.

[38] ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation. Use of booms in Oil Pollution Response, 2014.

[39] KHAN, E.; VIROJNAGUD, W.; RATPUKDI, T. Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. Chemosphere, v. 57, p. 681–689, 2004.

[40] LANZILLOTTA, H. A. A. Árvores de Decisão como Ferramentas de Apoio à Resposta a Derrames de Óleo. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

[41] LOPES, C. F.; MILANELLI, J. C. C.; POFFO, I. R. F. Ambientes Costeiros contaminados por óleo Procedimentos de limpeza- Manual de orientação. São Paulo: CETESB, v.120, 2007.

[42] LUIS-ZARATE, V. H.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, C.; ALATRISTE-MONDRAGON, F.; CHAZARO-RUIZ, L. F.; RANGEL-MENDEZ, J. R. Coconut endocarp and mesocarp as both biosorbents of dissolved hydrocarbons in fuel spills and as power a source when exhausted. Journal of Environmental Managenment, v. 211, p. 103-111, 2018.

[43] MAGDALENA, C. P. Adsorção de corante reativo remazol vermelho RB de solução aquosa usando zeólita de cinzas de carvão e avaliação da toxidade aguda com Daphnia Similis. 2010. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

[44] MIRANDA, I., SIMOES, R., MEDEIROS, B., NAMPOOTHIRI, K. M., SUKUMARAN, R. K., RAJAN, D., PEREIRA, H., DIAS, S. Valorization of lignocellulosic residues from the olive oil industry by production of lignin, glucose and functional sugars. Bioresource Technology, v. 292, pp. 121936, 2019.

[45] MOREIRA, Í. T. A. Investigação dos possíveis impactos ecológicos do petróleo sobre as comunidades biológicas estuarinas na Baía de Todos os Santos e no Sul da Bahia: OSA como uma ferramenta norteadora. 2014. 222f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2014.

[46] MORRISON, R., BOYD, R. Química Orgânica. 7a. Ed. Lisboa: Fundação Kaloustre Gulbekian, 1981.

[47] NASCIMENTO, F. N.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

[48] NWADIOGBU, J. O.; AJIWE, V. I. E.; OKOYE, P.A.C. Removal of crude oil from aqueous medium by sorption onhydrophobic corncobs: Equilibrium and kinetic studies. Journal of Taibah University for Science, v. 10, p. 56–63, 2016.

[49] NOAA. Nacional Oceanic and Atmospheric Administration. Deepwater Horizon Oil Spill, 2019. Disponível em: http://response.restoration.noaa.gov/taxonomy/term/188/all. Acesso em: 21 de março de 2019.

[50] NOAA. Nacional Oceanic and Atmospheric Administration. Deepwater Horizon Oil Spill, 2019. Disponível em: https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/significant-incidents/deepwater-horizon-oil-spill. Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

[51] OLIVEIRA, O. M. C. de; QUEIROZ, A. F. de S.; CERQUEIRA, J. R.; SOARES, S. A. R.; GARCIA, K. S.; FILHO, A. P.; ROSA, M. L. da S.; SUZART, C. M.; PINHEIRO, L. de L.; MOREIRA, Í. T. A. Environmental disaster in the northeast coast of Brazil: forensic geochemistry in the identification of the source of the oily material. Marine Pollution Bulletin, v. 160, 111597, nov. 2020.

[52] PAGNUCCO, R.; PHILLIPS, M. L. Comparative effectiveness of natural by-products and synthetic sorbents in oil spill booms. Journal of Environmental Management, v. 225, p. 10–16, 2018.

[53] PEDROSA, C. A. C.; BARRETO, C. R. A.; NUNES, I. L. S.; MAIA, L. A. B.; GUIMARÃES, P. L. C.; CORONA, R. D. Descarte e Beneficiamento da casca do coco verde. Ciclo do coco, 2019. Disponível em: https://ciclodococo.wordpress.com/justificativas/. Acesso em: 23/01/2026.

[54] PESSÔA, T.S.; FERREIRA, L. E. L.; SILVA, M. P.; NETO, L. M. P.; NASCIMENTO, B. F.; FRAGA, T. J. M.; JAGUARIBE; CAVALCANTE, J. V.; SOBRINHO, M. A. M. Açaí waste beneficing by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater, Journal of Cleaner Production, v. 240, p. 118047, 2019.

[55] POFFO, I. R. F. Vazamentos de Óleo no Litoral Norte do Estado de São Paulo: Análise Histórica (1974 a 1999). In: Abramovay, Ricardo. (org.). Construindo a Ciência Ambiental. São Paulo: Annablume – FAPESP, 2002. 438 p. 235 – 263.

[56] PETROBRAS. Tecnologias Pioneiras do Pré-sal, 2019. Disponível em: https://presal.hotsitespetrobras.com.br/tecnologias-pioneiras/#0. Acesso em: 20 de março de 2019.

[57] PETROBRAS. Geoquímica do petróleo. In: CENPES, Rio de Janeiro, 1984, p. 1-257.

[58] RAMIREZ, M. I.; AREVALO, A. P.; SOTOMAYOR, S.; BAILON-MOSCOSO, N. Contamination by oil crude extraction – Refinement and their effects on human helth. Environmental Pollution, v. 231, n. 1, p. 415-425, 2017.

[59] REYES, C. Y.; MOREIRA, I. T. A.; OLIVEIRA, D.; MEDEIROS, N.; ALMEIDA, M.; WANDEGA, F.; SOARES, S.; OLIVEIRA, O. Weathering of Petroleum Biomarkers: Review in Tropical Marine Environment Impacts. Open Access Library Journal, v. 1, n. 9, p. 1-2, 2014.

[60] REYES, C. Y. Simulação do intemperismo em mesocosmos para petróleos brasileiros. 2015. 284f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

[61] SANTOS, E. G.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, F. L. H. Cinética de adsorção de poluentes orgânicos por bioadsorventes. Química Nova, v. 30, n. 2, p. 327331, 2007.

[62] SANTOS, A. P.; CÂMARA, D. C.; COSTA, F.; SILVA, A. C. M.; MATTEDI, S. Estudo do equilíbrio de adosorção de petróleo utilizando fibras de coco e sisal. XI Encontro Brasileiro sobre Adsorção. EBA, 2017.

[63] SILVA, A. S. Pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar com líquidos iônicos: efeito na destruturação da parede celular na eficiência da hidrólise enzimática. 2013. 152f. Tese (Doutorado em Bioquímica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

[64] SRINIVASAN, A.; VIRARAGHAVAN, T. Removal of oil by walnut shell media. Bioresource Technology, v. 99, p. 8217-1220, 2008.

[65] SOARES, D.; DEMEKE, M. M.; FOULQUIÉ-MORENO, M. R.; VELDE, M. V.; VERPLAETSE, A.; FERNANDES, A. A. R.; THEYELEIN, J. M.; FERNANDES, P. M. B. Green coconut mesocarp pretreated by naalcaline process as raw material for bioethanol production. Bioresource Technology, v. 216, p. 744-753, 2016.

[66] SOUSA JUNIOR, C. S. Comportamento reológico de dispersões aquosas em óleo leve pesado. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, v.5,p. 7, 2009.

[67] SILVA, A. C. M. Recuperação de óleos isolantes por adsorção. 2000. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.

[68] SUN, R. C.; FANG J. M.; TOMKINSON, J. Characterization and esterification of hemicelluloses from rye straw. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 18, p. 1247–1252, 2000.

[69] TESTOLIN, R. C.; LIMA, A. O.; STRUTZ, J. M.; CORRÊA, R.; POYER-RADETSKI, G.; CESCONETTO, L.; FELDE, A.; RADETSK, C. M. Remediation efficiency of different methods for rapid-response of microbiological and/or organic matter contaminated beach sand: A laboratory study. Marine Pollution Bulletin, v. 141, p. 84-90, 2019.

[70] THAKUR, K. V.; THAKUR, M. K. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. Carbohydrate Polymers, v. 109, p. 102-117, 2014.

[71] US DEPT OF DEFENSE, 2019. Disponível em: https://www.defense.gov/photoessays/photoessayss.aspx?id=1667. Acesso em: 28 de dezembro de 2019.

[72] VENKATRAMAN, G.; GIRIBABU, N.; MOHAN, P. S.; MUTTIAH, B.; GOVINDARAJAN, V. K.; ALAGIRI, M.; RAHMAN, P. S. A.; KARSANI, S A. Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: a detailed review. Chemosphere, v. 351, p. 141227, 2024.

[73] VIJAYANAND, M.; RAMAKRISHNAN, A.; SUBRAMANIAN, R.; ISSAC, P. K.; NASR, M.; KHOO, K. S.; RAJAGOPAL, R.; GREFF, B.; AZELEE, N. I. W.; JEON, B.-H.; CHANG, S. W.; RAVINDRAN, B. Polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in the water environment: a review on toxicity, microbial biodegradation, systematic biological advancements, and environmental fate. Environmental Research, v. 227, 115716, 15 jun. 2023.

[74] WANG, J.; ZHENG, Y.; WANG, A. Investigation of acetylated kapok fibers on the sorption of oil in water. Journal of Environmental Sciences, v. 25, n. 2, p. 246-253, 2013.

[75] WEBER Jr., W.; MCGINLEY, P.M.; KATZ, L. Sorption phenomena in subsurface systems:concepts, models and effects on c contaminant fate and transport. Water Research, v. 25, n. 5, p. 499-528, 1991.

[76] YANG, C.; WANG, Z.; YANG, Z.; HOLLEBONE, B.; FIELDHOUSE, B.; LAMBERT, P.; FINGAS, Merv. Chemical fingerprints and chromatographic analysis of crude oils and petroleum products. In: FINGAS, Merv. The chemistry of oil and petroleum products. Berlin: De Gruyter, cap. 2, p. 47–126, 2022.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

editorapoisson

9 786558 666967